С. В. Зверева

В мире СОЛНЕЧНОГО СВЕТА

С. В. Зверева

В *мире* СОЛНЕЧНОГО СВЕТА



ЛЕНИНГРАД ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ 1988

ББК 26.23
З 43

Рецензент д-р физ.-мат. наук К. С. Шифрин

З 43 С. В. Зверева. В мире солнечного света. Л., Гидрометеоиздат, 1988, 160 стр. с ил.

Книга вводит читателя в яркий, красочный, а порой и загадочный, мир световых явлений в атмосфере. В ней рассказывается о таких знакомых читателю явлениях, как радуги, большие и малые круги вокруг Солнца или Луны. Многим, видевшим эти явления, небезынтересно узнать, как с научной точки зрения объясняется их возникновение. Почему, например, безоблачное небо голубое, а облачное белое? Почему ночное небо темное, а не ослепительно яркое, как Солнце? Читатель узнает, как возникают полярные сияния, миражи, какие необычные по яркости и краскам световые явления видят космонавты из космоса, и еще многое другое. Описаны и такие явления, которые многие не видели не потому, что они редко возникают, а просто потому, что не знали где, когда и на что надо смотреть. Это и подскажет читателю предлагаемая книга.

Книга рассчитана на широкий круг читателей, которые любят природу. Она будет полезна студентам метеорологических, географических, океанологических специальностей, а также школьникам для расширения представлений об окружающей природе.

З $\frac{1903040000-132}{069(02)-88}$ 58-88 ББК 26.23

ISBN 5—286—00078—9

Предисловие

Мир солнечного света, воспринимаемый нашим органом зрения, огромен, разнообразен, неисчерпаем. Все удивительное богатство форм предметов, их цветовых тонов, оттенков, уровней яркости, которое мы встречаем в окружающей нас природе на Земле, в атмосфере,— все породили Солнце и глаз человека!

В предлагаемой книге основное внимание уделяется солнечному свету как источнику световых явлений, возникающих в атмосфере, и зрению человека, с помощью которого мы видим окружающий мир.

В книге рассказывается о световых явлениях, возникающих при рассеянии света в чистой атмосфере и атмосфере, замутненной присутствием аэрозоля. Рассеяние света создает светлый купол небосвода, обусловливает изменение цвета неба от насыщенно-голубого до белесого, рождает богатейшую палитру красок небосвода во время сумерек, изменяет золотистый цвет Солнца на оранжевый, красный, а иногда даже на зеленый и голубой. Радуги, разнообразные формы гало, венцы, глории также порождены рассеянием света в атмосфере.

Ограничение и потеря дальности видимости наземных предметов происходит за счет рассеяния света. Когда при тумане, или выпадающих осадках, или низких облаках „закрывается" аэродром, не разрешается вылет или посадка самолетов, то главный виновник этого — рассеяние света.

Многие современные оптические методы зондирования атмосферы в конечном счете сводятся к измерению характеристик либо рассеянного атмосферой солнечного света (ракетные, спутниковые методы, измерения с орбитальных станций и космических кораблей, сумеречный метод), либо рассеянного атмосферой света искусственных источников (лидаров, прожекторов). Для успешного проведения этих измерений, а главное, их интерпретации надо знать рассеивающую способность неба на разных высотах.

Большое внимание уделено в книге явлениям, обусловленным преломлением световых лучей в атмосфере. Описаны разнообразные формы миражей, искажения солнечного диска при восходе или заходе, удлинение дня, зеленый луч и другие явления рефракции.

Заканчивается книга сравнением всех источников освещения земной поверхности в ночное время. Ведущую роль играют источники солнечного происхождения. Это, прежде всего, ночное свечение атмосферы, в котором реализуется накопленная за день солнечная энергия, а также солнечный свет, рассеянный в околоземном и околосолнечном пространстве и отраженный от поверхности Луны. Полярные сияния также обусловлены взаимодействием с земной атмосферой солнечных корпускулярных потоков.

Подавляющее большинство описанных световых явлений можно наблюдать всегда и везде: в ясный и в пасмурный день, на суше и на море, в сельской местности и даже в городах. Правда, жители городов находятся в более трудных условиях. Закрытость горизонта и, главное, напряженный ритм жизни, городской транспорт с его шумом приковывают внимание к тому, что человек видит перед собой в непосредственной близости на Земле. Человек отвыкает наблюдать за небом. Поэтому хочется призвать всех:

при каждой возможности отрывайте взгляд от земли и смотрите на небо! Как разнообразно оно и каждый раз по-своему удивительно красиво!

Некоторые световые явления, автору не известные, не попали в книгу. Новые световые явления открываются постоянно, есть и такие, причину которых пока не знают даже специалисты. Автор будет весьма признателен всем, кто пришлет на адрес издательства Гидрометеоиздат в Ленинграде описание виденных ими явлений, не упомянутых в книге. Желательно указать метеорологические условия, при которых световые явления наблюдались.

Автор сердечно благодарит проф. К. С. Шифрина, высказавшего очень много полезных советов при обсуждении рукописи, а также С. В. Загоруйко, предоставившего интересные фотографии рефракционных явлений в атмосфере.

РАССЕЯНИЕ СВЕТА

1. Старые и новые загадки небесного свода

Мирозданье постигая,
Все познай, не отбирая:
Что — внутри, во внешнем сыщешь;
Что — вовне, внутри отыщешь.
Так примите ж без оглядки
Мира внятные загадки.

Гёте

Атмосферная оптика является одной из наиболее древних наук. Она зародилась тысячелетия назад в процессе наблюдения человеком окружающей природы. И началась атмосферная оптика с небесного свода, поскольку все, что мы видим в атмосфере, мы мысленно относим на небесный свод как на экран. Мы не в состоянии зрительно оценить расстояние до явлений, наблюдаемых на небосводе. Мы не чувствуем, что Солнце много дальше от Земли, чем Луна, что одни созвездия ближе, а другие дальше, что полярные сияния значительно выше, чем радуги и т. п. С древнейших времен люди следили за движением по небосводу Солнца, Луны, созвездий, за перемещением облаков, появлением световых кругов вокруг Солнца и Луны и другими явлениями. Внимание человека всегда привлекали красочные зори, сопровождающие восходы и заходы Солнца, яркие радуги, неуловимая игра красок в полярных сияниях. Появление миражей удивляло, а затмения Солнца и Луны, сложные формы гало в виде нескольких солнц на небосводе одновременно, кругов и крестов долгое время наводили суеверный страх, служили дурным предзнаменованием.

Каких только световых явлений не демонстрировала Природа на небесном своде из своих неисчерпаемых запасов! Многие из них долгое время оставались загадками небесного свода. Но когда их удавалось разгадать, Природа загадывала новые!

Прежде чем приступить к разгадыванию старых и новых загадок небесного свода, мы должны познакомиться с главным их „виновником“ — солнечным светом. Это его лучи, проходя через атмосферу и взаимодействуя с нею, порождают многочисленные световые явления.

Солнце как источник света

Мы живем в мире солнечного света. Солнце — главный источник энергии на Земле и главный источник освещения земной поверхности. Без Солнца Земля была бы темной планетой, так как у нее нет сколько-нибудь значительных собственных источников освещения. Действительно, на Земле светятся

жуки-светляки и другие наземные и морские животные, светятся гнилушки за счет микроорганизмов, вызывающих гниение. Небольшое количество света испускает атмосфера в виде ночного свечения, которое происходит повсюду на земном шаре. Более интенсивное свечение в виде полярных сияний наблюдается в полярных районах. Кратковременно Земля освещается молниями и более длительно — светом, сопровождающим извержения вулканов. Роль всех перечисленных источников в освещении земной поверхности в сравнении с солнечным светом ничтожно мала, к тому же во всех них реализуется накопленная солнечная энергия.

Что же представляет собой наше Солнце? Это огромный газообразный шар радиусом 695 500 км. Масса Солнца составляет $1{,}98 \cdot 10^{30}$ кг. Средняя плотность солнечной материи немного больше плотности воды и равна 1,4 г/см^3.

Земля вращается вокруг Солнца по эллиптической орбите. Среднее расстояние Земли от Солнца равно 149 500 000 км, округленно $1{,}5 \cdot 10^{11}$ м. Это расстояние называют *астрономической единицей* (а. е.). Оно принято в качестве основной единицы для измерения расстояний в Солнечной системе. На самом большом удалении от Солнца (1,067 а. е.) Земля находится 4 июля. Эта точка орбиты Земли называется *афелием*. На самом маленьком удалении от Солнца (0,983 а. е.) Земля находится 3 января. Эта точка орбиты называется *перигелием*. Видимый угловой диаметр солнечного диска составляет 32′, телесный угол, под которым мы его видим с Земли, составляет $6{,}8 \cdot 10^{-5}$ стерадиана.

Непрозрачная внешняя светящаяся поверхность солнечного шара называется *фотосферой*. Она испускает основной поток солнечной энергии. Большая яркость фотосферы — мы не можем смотреть на Солнце незащищенным глазом — обусловлена высокой температурой ее поверхности, составляющей около 6000 K. Над фотосферой расположены *хромосфера*, простирающаяся до высоты 10 000—15 000 км, и *солнечная корона*. Последняя представляет собой почти полностью ионизированный газ (его называют *плазмой*). Солнечная корона простирается до земной орбиты. Мы живем, таким образом, в солнечной короне.

Солнце излучает радиацию в широком диапазоне длин волн. 99% его энергии заключено в интервале 0,10—4 мкм. Солнечный спектр делят на три части: ультрафиолетовую (УФ) область с длинами волн короче 0,39 мкм, видимую, или световую, часть спектра с длинами волн от 0,39 до 0,76 мкм и инфракрасную (ИК) область с длинами волн более 0,76 мкм. Распределение солнечной энергии между этими тремя областями следующее: на УФ-область приходится около 9%, на видимую —47% и на ИК-область — 44%.

Общее количество солнечной радиации, поступающее в единицу времени на единичную площадку на внешней границе атмосферы, перпендикулярную солнечным лучам, при среднем расстоянии Земли от Солнца называют *солнечной постоянной*. Значение солнечной постоянной определялось тщательными измерениями на протяжении длительного времени, сейчас оно принято равным 1370 Вт/м^2. Это означает, что на каждый квадратный метр поверхности, перпендикулярной солнечным лучам и удаленной от Солнца на 1 а. е., падает 1370 Вт солнечной энергии.

Световые явления, описанные в данной книге, создаются не всем солнечным потоком, а только его световой частью. Электромагнитные волны

не только от Солнца, но и от любого другого источника, длины которых заключены между 0,39 и 0,76 мкм, как известно, обладают особыми свойствами: попадая в глаз человека, они вызывают *ощущение света*. Поэтому их и назвали световыми или видимыми. Подробнее свойства световых потоков и их характеристики будут рассмотрены в главе 8.

Световое излучение любого источника света характеризуется специальными *световыми величинами*, для измерения которых применяются *световые единицы*. Приведем основные световые характеристики Солнца. Начнем с освещенности.

Световой поток солнечных лучей, поступающий на внешнюю границу атмосферы, создает там освещенность на площадке, перпендикулярной лучам, равную 135 000 лк. Эту освещенность назвали *световой солнечной постоянной* или *заатмосферной освещенностью*. Обозначим ее E_0.

Все световые характеристики связаны между собой определенными простыми соотношениями. Например, освещенность E связана с силой света I зависимостью:

$$E = I/L^2. \qquad (1.1)$$

Отсюда, зная E_0, создаваемую Солнцем на расстоянии $L = 1$ а. е., вычислим силу света Солнца I:

$$I = 135\,000\ (1{,}5\cdot 10^{11})^2 = 3\cdot 10^{27}\ \text{кд}.$$

Яркость солнечного диска составляет $2\cdot 10$ кд/м^2.

Вычислим *общий световой поток* F, испускаемый Солнцем во всевозможные направления с одинаковой силой света I. Учитывая, что полный телесный угол равен 4π стерадиан, получим:

$$F = 4\pi I = 3{,}8\cdot 10^{28}\ \text{лм}.$$

Общий поток энергии Ф, излучаемой Солнцем во всех длинах волн в окружающее пространство, составляет $3{,}9\cdot 10^{26}$ Вт. Солнечные лучи несут с собою солнечную массу. Дошедшая до Земли солнечная энергия — это часть массы Солнца. Чтобы нагляднее представить себе, насколько велик общий поток энергии, излучаемой Солнцем каждую секунду, подсчитаем, какую массу теряет Солнце за счет излучения потока в $3{,}9\cdot 10^{26}$ Вт. Для решения воспользуемся формулой, связывающей полную энергию тела или системы Ф с его массой m:

$$\Phi = m\cdot c^2. \qquad (1.2)$$

Здесь c — скорость света в пустоте, равная $3\cdot 10^8$ м/с. Отсюда

$$m = \Phi/c^2 = 3{,}9\cdot 10^{26}/(3{,}8\cdot 10^8)^2 = 4{,}3\cdot 10^9\ \text{кг} = 4{,}3\cdot 10^6\ \text{т}.$$

Таким образом, Солнце „худеет“ каждую секунду на 4,3 млн. т!

Однако масса Солнца настолько велика ($1{,}98\cdot 10^{30}$ кг), что для него такая потеря совсем неощутима. Из 4,3 млн. т массы, излучаемой Солнцем в окружающее пространство, на земную поверхность падает (на половину Земли, освещенную Солнцем) всего около 1,9 кг. Вот из этих 1,9 кг солнечной массы и черпается энергия на все процессы, протекающие в атмосфере и на земной поверхности!

Ослабление солнечных лучей в атмосфере

Приведенные световые характеристики Солнца относятся к внешней границе атмосферы. Проходя через земную атмосферу, поток солнечных лучей по пути частично рассеивается и частично поглощается и до Земли доходит ослабленным. Чем ближе опускается Солнце к горизонту, тем больше ослабляются его лучи (рис. 1.1). На рисунке наблюдатель находится на Земле в точке O. Если Солнце в зените, т. е. вертикально над головой, то его лучи проходят в атмосфере путь AO. Солнце немного отошло из зенита на зенитный угол AOB. Зенитное расстояние Солнца обозначим z. Теперь его лучи проходят более длинный путь BO. По мере опускания Солнца к горизонту путь его лучей будет увеличиваться (BO, CO, DO) и достигнет максимальной длины (EO), когда Солнце окажется на горизонте. Чем длиннее путь лучей, тем больше энергии они будут терять на этом пути.

Ослабление солнечных лучей в атмосфере происходит за счет двух процессов: поглощения и рассеяния. Поглощенная солнечная радиация переходит в другие виды энергии, в основном в тепловую, т. е. расходуется на нагревание воздуха. Поглощение солнечной радиации газами атмосферы носит избирательный, или селективный, характер, т. е. поглощаются определенные длины или участки длин волн. Главными поглотителями солнечной радиации являются озон, водяной пар и углекислый газ. Основное поглощение происходит в УФ- и ИК-областях солнечного спектра. В видимой части спектра поглощение играет малую роль в сравнении с рассеянием. Именно *за счет рассеяния происходит главное ослабление световых солнечных лучей*. При рассеянии световых лучей в атмосфере и возникают многообразные световые явления, объяснение которых является предметом данной книги.

Рассеяние световых лучей также сильно зависит от длины волны. Поэтому, проходя через атмосферу, лучи разных длин волн ослабляются по-разному. Закон ослабления, выведенный еще в XVIII в. французским физиком Пьером Бугером, записывается для так называемого *монохроматического* пучка лучей, т. е. пучка лучей определенной длины волны λ:

$$S_\lambda = S_{0\lambda} \cdot e^{-\tau_\lambda m}, \qquad (1.3)$$

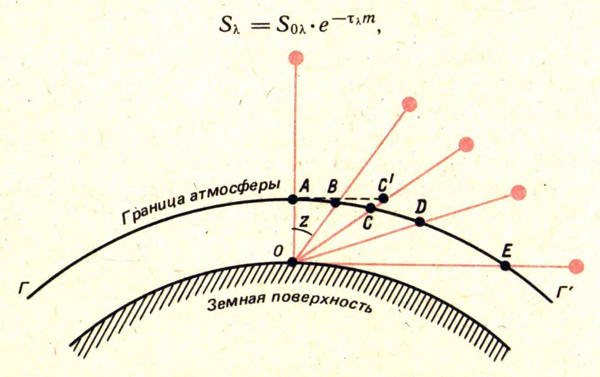


Рис. 1.1. Длина пути, проходимого солнечными лучами в атмосфере, при разных зенитных расстояниях Солнца.

где S_λ — плотность потока (или интенсивность) пучка монохроматических лучей длины волны λ, дошедших до поверхности Земли; $S_{0\lambda}$ — плотность потока (или интенсивность) этого пучка на внешней границе атмосферы; m — масса или число масс атмосферы; τ_λ — оптическая толщина атмосферы, равная:

$$\tau_\lambda = \int_0^\infty \alpha_\lambda(L)\, dL. \qquad (1.4)$$

Здесь α_λ — *объемный коэффициент ослабления,* который представляет собой отношение интенсивности светового потока, ослабленного (т. е. поглощенного и рассеянного во всех направлениях) единицей объема воздуха, к интенсивности светового потока, упавшего на единицу объема. Таким образом, α_λ характеризует относительное количество света, задержанного единицей объема.

Оптическая толщина атмосферы, согласно (1.4), представляет собой просуммированные по всей толщине атмосферы объемные коэффициенты ослабления. Другими словами, оптическая толщина атмосферы есть объемный коэффициент ослабления *единичного слоя атмосферы* сечением, равным единице площади (1 м^2), и высотой, равной высоте атмосферы.

Масса атмосферы (или число масс атмосферы) m представляет собой отношение оптической толщины атмосферы, проходимой солнечными лучами при зенитном расстоянии Солнца z, к оптической толщине, проходимой при положении Солнца в зените ($z = 0$).

Для зенитных расстояний менее 60° масса атмосферы m, как это видно и из рис. 1.1, вычисляется по формуле:

$$m = \sec z. \qquad (1.5)$$

Для бо́льших зенитных расстояний расчеты проводятся по более сложной формуле Бемпорада, из которой получены следующие значения m при различных зенитных расстояниях z:

z...	60°	80°	85°	90°
m...	2,0	5,6	10,4	35,4

Например, при зенитном расстоянии Солнца 60° (высота Солнца 30°) масса атмосферы равна 2. Это означает, что лучи Солнца проходят массу атмосферы в 2 раза бо́льшую, чем при положении Солнца в зените, а при положении Солнца на горизонте ($z = 90°$) они проходят массу атмосферы в 35 раз бо́льшую, чем при положении Солнца в зените.

Оптическая толщина атмосферы связана простым соотношением с другой характеристикой ослабления атмосферы — *коэффициентом прозрачности* P_λ:

$$P_\lambda = e^{-\tau_\lambda}. \qquad (1.6)$$

Подставляя P_λ в (1.3), получим:

$$S_\lambda = S_{0\lambda} P_\lambda^m. \qquad (1.7)$$

При $m = 1$

$$P_\lambda = S_\lambda / S_{0\lambda}. \qquad (1.8)$$

Таким образом, коэффициент прозрачности атмосферы равен отношению интенсивности светового потока, дошедшего до поверхности Земли при единичной массе атмосферы (т. е. при вертикальном падении солнечных лучей), к его интенсивности на внешней границе атмосферы.

В отличие от коэффициента ослабления и оптической толщины атмосферы, характеризующих доли радиации, задержанные (или ослабленные) единицей объема и единичной толщей атмосферы соответственно, коэффициент прозрачности характеризует долю радиации, пропущенную атмосферой, т. е. дошедшую до поверхности Земли при единичной массе атмосферы.

Для всего потока солнечных лучей (его называют также *интегральным потоком*) формула (1.3) приобретает вид:

$$S = S_0 P^m, \qquad (1.9)$$

где P — коэффициент прозрачности, осредненный для интегрального потока; S_0 — солнечная постоянная.

Коэффициент прозрачности атмосферы P при среднем состоянии ее замутнения равен примерно 0,8; высоко в горах он может достигать 0,9. При большой мутности атмосферы (дымка, туман, мгла и т. п.) P уменьшается до 0,6 и меньше. При наличии облаков, когда диск Солнца становится невидимым, коэффициент прозрачности для прямых солнечных лучей равен 0.

Поскольку нас интересует только световая часть потока солнечной радиации, запишем формулу (1.9) применительно к освещенности, так как именно освещенность является световым эквивалентом прямой солнечной радиации. Итак, у поверхности Земли на площадке, перпендикулярной солнечным лучам, прямым солнечным светом создается освещенность

$$E = E_0 P^m, \qquad (1.10)$$

где E_0 — световая солнечная постоянная.

В отличие от прямой солнечной радиации освещенность обычно измеряют на горизонтальную поверхность. Обозначим ее $E_{гор}$. Если Солнце находится на высоте h, то

$$E_{гор} = E_0 P^m \sin h. \qquad (1.11)$$

Освещенность рассеянным светом, поступающим от всего небосвода, также измеряют на горизонтальную поверхность.

Почему небо голубое? Почему Солнце красное?

Эти вопросы, такие естественные, возникали перед человеком с глубокой древности. Однако чтобы получить правильное объяснение этих явлений, потребовались усилия выдающихся ученых средних веков и более позднего времени, вплоть до конца XIX в.

Каких только гипотез не выдвигалось в разное время для объяснения цвета неба. Наблюдая, как дым на фоне темного камина приобретает синеватый цвет, Леонардо да Винчи писал: „...светлота поверх темноты становится синей, тем более прекрасной, чем превосходными будут светлое и темное“. Примерно такой же точки зрения придерживался Гёте, который был

не только всемирно известным поэтом, но и крупнейшим ученым естествоиспытателем своего времени. Однако такое объяснение цвета неба оказалось несостоятельным, поскольку, как стало очевидно позднее, смешение черного и белого может дать только серые тона, а не цветные. Синий цвет дыма из камина обусловливается совершенно другим процессом.

После открытия интерференции, в частности в тонких пленках, Ньютон пытался применить интерференцию к объяснению цвета неба. Для этого ему пришлось допустить, что капли воды имеют форму тонкостенных пузырей, наподобие мыльных. Но так как капельки воды, содержащиеся в атмосфере, в действительности представляют собой сферы, то и эта гипотеза вскоре „лопнула", как мыльный пузырь.

Ученые XVIII в. Мариотт, Бугер, Эйлер думали, что голубой цвет неба объясняется собственным цветом составных частей воздуха. Такое объяснение даже получило некоторое подтверждение позднее, уже в XIX в., когда установили, что жидкий кислород имеет голубой цвет, а жидкий озон — синий. Ближе всех к правильному объяснению цвета неба подошел О. Б. Соссюр. Он считал, что если бы воздух был абсолютно чистым, то небо было бы черным, но воздух содержит примеси, которые отражают преимущественно голубой цвет (в частности — водяной пар и капельки воды).

Ко второй половине XIX в. накопился богатый экспериментальный материал по рассеянию света в жидкостях и газах, в частности была обнаружена одна из характеристик рассеянного света, поступающего от небосвода,— его поляризация. Первым ее открыл и исследовал Араго. Это было в 1809 г. Позднее исследованиями поляризации небесного свода занимались Бабине, Брюстер и другие ученые.

Вопрос о цвете неба настолько приковывал внимание ученых, что проводимые эксперименты по рассеянию света в жидкостях и газах, имевшие гораздо более широкое значение, проводились под углом зрения „лабораторное воспроизведение голубого цвета неба". Об этом говорят и названия работ: „Моделирование голубого цвета неба" Брюкке или „О голубом цвете неба, поляризации света облачным веществом вообще" Тиндаля. Успехи этих экспериментов направили мысли ученых по правильному пути — искать причину голубого цвета неба в рассеянии солнечных лучей в атмосфере.

Первым, кто создал стройную, строгую математическую теорию молекулярного рассеяния света в атмосфере, был английский ученый Рэлей. Он считал, что рассеяние света происходит не на примесях, как это думали его предшественники, а на самих молекулах воздуха. Первая работа Рэлея по рассеянию света была опубликована в 1871 г. В окончательном виде его теория рассеяния, основанная на электромагнитной природе света, установленной к тому времени, была изложена в работе „О свете от неба, его поляризации и цвете", вышедшей в свет в 1899 г.

За работы в области рассеяния света Рэлея (его полное имя Джон Уильям Стретт, лорд Рэлей III) часто называют Рэлеем Рассеивающим, в отличие от его сына, лорда Рэлея IV. Рэлея IV за большой вклад в развитие физики атмосферы называют Рэлеем Атмосферным.

Для объяснения цвета неба приведем только один из выводов теории Рэлея, к другим мы еще будем обращаться несколько раз при объяснении различных оптических явлений. Этот вывод гласит: яркость, или интенсивность, рассеянного света изменяется обратно пропорционально четвертой степени длины волны света, падающего на рассеивающую частицу. Таким

образом, молекулярное рассеяние чрезвычайно чувствительно к малейшему изменению длины волны света. Например, длина волны фиолетовых лучей (0,4 мкм) примерно в два раза меньше длины волны красных (0,8 мкм). Поэтому фиолетовые лучи будут рассеиваться в 16 раз сильнее, чем красные, и при равной интенсивности падающих лучей их в рассеянном свете будет в 16 раз больше. Все остальные цветные лучи видимого спектра (синие, голубые, зеленые, желтые, оранжевые) войдут в состав рассеянного света в количествах, обратно пропорциональных четвертой степени длины волны каждого из них. Если теперь все цветные рассеянные лучи смешать в таком соотношении, то цвет смеси рассеянных лучей будет голубым.

Прямой солнечный свет (т. е. свет, исходящий непосредственно от солнечного диска), теряя за счет рассеяния в основном синие и фиолетовые лучи, приобретает слабый желтоватый оттенок, который усиливается при опускании Солнца к горизонту. Теперь лучам приходится проходить в атмосфере все больший и больший путь. На длинном пути потери коротковолновых, т. е. фиолетовых, синих, голубых, лучей становятся все более заметными, и в прямом свете Солнца или Луны до поверхности Земли доходят преимущественно длинноволновые лучи — красные, оранжевые, желтые. Поэтому цвет Солнца и Луны становится сначала желтым, затем оранжевым и красным. Красный цвет Солнца и голубой цвет неба — это два следствия одного и того же процесса рассеяния. В прямом свете, после того как он проходит сквозь толщу атмосферы, остаются преимущественно длинноволновые лучи (красное Солнце), в рассеянный свет попадают коротковолновые лучи (голубое небо). Так теория Рэлея очень наглядно и убедительно объяснила загадку голубого неба и красного Солнца.

Все, конечно, обращали внимание, что цвет неба изменяется ото дня ко дню. Иногда оно насыщенно-голубое, а иногда белесое. В околозенитных частях небо самое голубое, а у горизонта всегда более белесое. Эти особенности изменения цвета неба теория Рэлея не могла объяснить. Ответ на эти вопросы получили позднее, когда было исследовано рассеяние света на более крупных частицах, имеющихся в атмосфере,— аэрозолях и создана теория аэрозольного рассеяния.

Атмосферная дымка

Рэлеевским законом рассеяния объясняется еще одно, всем известное световое явление — голубоватого цвета дымка, как вуаль, окутывающая далекие предметы ландшафта: горы, леса, строения.

Атмосферная дымка — это световая завеса, возникающая за счет рассеяния света (солнечного или от неба) в пространстве между наблюдателем и далеким предметом. Чем предмет дальше, тем он становится светлее и хуже виден, потому что ярче становится дымка, наложенная на него, и окружающий фон. Дымка, с одной стороны, скрадывает детали предметов, смягчает контрасты между светлыми и темными предметами и тем самым делает их хуже видимыми, а с другой — подчеркивает разницу в расстояниях до предмета. Например, близкий лес выглядит более зеленым и более темным, чем дальний. Благодаря этому становится ясно различимым рельеф местности. Это явление называют также воздушной перспективой.

На достаточно больших расстояниях, особенно в запыленном воздухе, предметы становятся невидимыми, скрытыми рассеянным светом атмосферы.

О новых загадках небесного свода

Долгое время оставалась нерешенной еще одна старая загадка, связанная с „внешним видом“ Солнца и Луны. Почему Солнце и Луна, находясь вблизи горизонта, выглядят в несколько раз больше, чем при высоком положении на небосводе? О решении этой загадки будет рассказано в главе 3.

Сумеречное и ночное небо тоже загадали людям свои интересные загадки. Наблюдения земной поверхности и атмосферы с космических кораблей и орбитальных станций принесли богатую информацию о новых ярких световых явлениях, наблюдаемых из космоса. Атмосферная оптика перестала быть оптикой только атмосферы, вместе с космическими кораблями и спутниками она вышла за ее пределы — в ближний и дальний космос. Рассказ о световых явлениях на небосводе, наблюдаемых с поверхности Земли и из космоса в дневное, сумеречное и ночное время, будет продолжен в следующих главах.

2. Рассеяние солнечного света и его законы

Знание действия зависит от знания причины и заключает в себе последнее.

Спиноза

Универсальность рассеяния света

Роль рассеяния света трудно переоценить. Она огромна. Универсальность процесса рассеяния поистине удивительна. Свет от самых разнообразных источников рассеивается в атмосфере постоянно и повсеместно. Даже привычное нам отражение света от окружающих нас твердых предметов и водных поверхностей, благодаря которому мы их видим, можно рассматривать как частный случай рассеяния, происходящего на „плотно упакованных“ атомах и молекулах твердых и жидких тел. Где бы мы ни находились, под открытым небом или в помещении, в каком бы направлении ни посмотрели, мы отовсюду встречаем потоки рассеянного света. Атмосфера в буквальном смысле слова заполнена рассеянным светом, потоки которого постоянно пересекают ее в самых разнообразных направлениях.

Рассеяние происходит как вблизи поверхности Земли, так и на всех уровнях в атмосфере и далеко за ее пределами. В процессе рассеяния участвует все вещество атмосферы. Это молекулы и атомы газов, составляющих воздух на разных высотах. Это многочисленные разнообразные по происхождению, составу, размерам, форме твердые частички, взвешенные в воздухе. Это продукты конденсации водяного пара в атмосфере — различных размеров капельки воды и кристаллы льда, составляющие дымки, туманы, облака, осадки. Все перечисленные твердые и жидкие частички, находящиеся в атмосфере во взвешенном состоянии, называют *аэрозолями*.

Рассеяние происходит во всех длинах электромагнитных волн, от самых коротких γ-лучей и рентгеновских лучей до самых длинных радиоволн. Нас, в первую очередь, будет интересовать рассеяние световых волн, а в отдельных случаях — близких к ним ультрафиолетовых и инфракрасных волн.

Примеры явлений, обусловленных рассеянием, да и непосредственно сам рассеянный свет мы видим ежедневно в самых разнообразных проявлениях. Перечислим только некоторые из них. Это голубой купол небосвода: изменчивость его цвета, яркости, да и форма непосредственно обусловлены рассеянием света. Это различные оптические явления во время сумерек, красочные зори, сопровождающие восходы и заходы Солнца. Это ограниченная дальность видимости объектов в атмосфере. Когда вы не можете вылететь из какого-то пункта по погодным условиям и ждете разрешения на вылет часами, а случается, и сутками, или, наоборот, ваш самолет не принимает пункт назначения, то в этом, в конечном итоге, тоже часто повинно рассеяние света. Чтобы посадить самолет, летчик должен увидеть с определенного, не ниже некоторого минимально допустимого, расстояния днем — взлетно-посадочную полосу (она видна благодаря отраженному от нее дневному свету), ночью — хотя бы некоторое минимальное количество сигнальных огней, подводящих самолет к полосе, и огней на самой полосе, обозначающих ее положение и границы. При наличии над районом аэродрома тумана, низких плотных облаков, выпадающих осадков (особенно снегопадов) аэродром „закрывается", не разрешается посадка, а иногда и взлет самолетов. Почему? Рассеяние света в таких аэрозольных скоплениях, как туманы, облака, осадки, настолько велико, что сквозь них не может „пробиться" ни свет, отраженный от взлетно-посадочной полосы, ни свет ее сигнальных огней. Рассеяние света делает эти аэрозольные скопления непрозрачными для световых лучей уже при толщине облака или тумана порядка 200—300 м.

Многочисленные и разнообразные световые явления, наблюдаемые в облаках или выпадающих осадках, такие, как знакомые всем радуги, глории, нимбы, круги и дуги гало,— все они обязаны своим происхождением рассеянию света, или, лучше сказать, они непосредственный результат рассеяния света.

Важна роль рассеяния света в жизни человека. Мы пользуемся рассеянным светом внутри зданий и на открытом воздухе в дневные часы, когда Солнце закрыто облаками. В некоторых районах мира, где часто повторяются облака слоистых форм, доля рассеянного света в общей сумме солнечного света, поступающего на земную поверхность за год, достигает 50%, а в ряде мест даже 80%.

Благодаря рассеянию света в атмосфере переход ото дня к ночи и от ночи ко дню совершается не мгновенно, а растягивается на некоторый промежуток времени. Ночью Земля продолжает получать рассеянный свет от различных источников. Рассеянный солнечный и звездный свет поступает от зодиакального пылевого облака, находящегося в межпланетном пространстве Солнечной системы. Рассеяние света происходит в газопылевых туманностях в межзвездном пространстве нашей Галактики и далеко за ее пределами в других галактиках, в других звездных мирах. Вся безграничная Вселенная заполнена разнообразными скоплениями вещества и всюду происходит рассеяние света.

Как происходит рассеяние света?

Попробуем совсем кратко пояснить суть процесса рассеяния с помощью электромагнитной теории света и электронной теории строения вещества. Согласно электромагнитной теории, распространение света в любой среде есть распространение в ней электромагнитных волн. Во всякой точке пространства, до которой дошел свет, внезапно появляется переменное электромагнитное поле, напряженность электрического и магнитного полей которого изменяется периодически с частотой этой электромагнитной волны.

Световой поток распространяется в некоторой среде, например атмосфере. На его пути встречается малая частица, размер которой существенно меньше длины падающей волны и показатель преломления которой отличается от показателя преломления окружающей среды. Эта частица, например молекула или атом, забирая у падающей волны часть ее энергии, под влиянием переменного электромагнитного поля падающей волны превращается в диполь, у которого „центры тяжести" электронов и положительных зарядов оказались разделенными некоторым расстоянием. Электрический момент диполя будет изменяться периодически в такт с изменением поля падающей волны. Такой диполь сам становится источником новых электромагнитных волн, которые он излучает в окружающее пространство в виде волн рассеянного света. Рассеяние будет происходить до тех пор, пока на частицу падает световой поток.

Такое рассеяние, когда размер рассеивающей частицы много меньше длины падающей на нее волны, называют *молекулярным* или *рэлеевским*.

Рассеивающими частицами являются не сами молекулы воздуха, как это считал Рэлей, а их случайные сгущения, обусловленные тепловым и турбулентным движениями. Эти случайные сгущения молекул воздуха были названы *флюктуациями плотности*. Теория флюктуационного рассеяния была создана физиком М. Смолуховским и А. Эйнштейном. Основные ее выводы совпали с выводами теории Рэлея. Поэтому за этим видом рассеяния исторически закрепилось название молекулярного, или рэлеевского.

Атмосферный аэрозоль

В атмосфере всегда присутствуют во взвешенном состоянии самые разнообразные по происхождению и свойствам частички, размер которых много больше и самих молекул воздуха и их флюктуаций,— аэрозоли. Естественным и самым распространенным аэрозолем в атмосфере являются продукты конденсации и сублимации водяного пара. Это капельки воды и кристаллы льда. Из них составляются различные облака и туманы.

Постоянно присутствуют в атмосфере твердые частички разнообразного происхождения. Это, например, пыль, поднимаемая ветром с поверхности Земли. Основными „поставщиками" пыли являются пустыни Азии и Африки. Миллионы тонн пыли ежегодно выносятся из этих регионов, переносятся воздушными потоками на большие расстояния и достигают практически всех частей света. Этот вид аэрозоля называют *аридным*. Аэрозоль поступает и из космоса в виде продуктов сгорания метеоритов в атмосфере. Выбросы промышленных предприятий, выхлопные газы автомобилей и другие продукты деятельности человека образуют так называемый *антропо-*

генный аэрозоль. Аэрозольные частицы поступают в атмосферу и при вулканических извержениях.

Все перечисленные виды аэрозоля представляют его *первую фракцию.* Эти частицы малогигроскопичны, химически инертны. Их концентрация определяется географическими условиями. Частицы первой фракции — крупные, радиусы пылинок составляют от 0,5 до 10 мкм, концентрация 0,01—2 $см^{-3}$. Первую фракцию называют также *грубодисперсной.* Частицы этой группы служат ядрами конденсации при образовании облаков и туманов.

Вторая фракция — это аэрозольные частицы, возникающие в самой атмосфере, на всех ее уровнях, в результате протекающих в ней химических реакций. Частички этого аэрозоля состоят из различных серно-кислородных и азотоводородных соединений, а также продуктов полимеризации органических соединений (продуктов сгорания или эфирных масел, выделяемых растительностью). Эту фракцию называют *микродисперсной.* Первоначальный размер частичек мал (0,005—0,050 мкм), затем они укрупняются и образуют устойчивую *субмикронную фракцию.* Размеры частичек менее микрометра (0,05—0,50 мкм).

Концентрация частичек субмикронной фракции у поверхности Земли $2 \cdot 10^3$ — $10 \cdot 10^3$ $см^{-3}$. С высотой уменьшаются и размеры частиц и их концентрация. Такие частички могут прожить в тропосфере несколько дней, а в стратосфере до года.

Теперь установлено, что именно этот аэрозоль, аэрозоль второй фракции, определяет оптические свойства атмосферы на всех высотах и в тропосфере и в стратосфере. Как говорят специалисты, аэрозоль этой группы наиболее активен в оптическом отношении, т. е. на нем происходит основное рассеяние света.

На некоторых уровнях в атмосфере создаются условия, более благоприятные для длительного существования этих частичек. Возникают более или менее устойчивые скопления частичек этого аэрозоля в виде *аэрозольных слоев.*

Оптические методы исследования атмосферы, о которых пойдет речь в главе 7, и направлены в основном на изучение этой фракции аэрозоля, на выявление аэрозольных слоев.

Аэрозольное рассеяние

Рассеяние на аэрозольных частицах происходит не так, как молекулярное, и подчиняется другим закономерностям. За некоторую условную границу, разделяющую оба вида рассеяния, принимают следующую. Если размер рассеивающих частиц начинает превышать примерно $^1/_{10}$ длины падающей волны, рассеяние считают *аэрозольным.* Его называют также *рассеянием Ми* или *рассеянием на крупных частицах.* Название дано в честь немецкого ученого Г. Ми, первым создавшего, еще в 1908 г., стройную математическую теорию рассеяния электромагнитных волн на изотропных сферических частицах любого размера и свойств (показателя преломления). Сам Ми назвал свою работу необычайно скромно — „К вопросу оптики мутных сред, особенно коллоидных растворов металлов“. В действительности решенная им математическая задача рассеяния на крупных частицах

имела громадное значение для развития атмосферной оптики. Во времена Ми и в течение нескольких последующих десятилетий трудно было применять его теорию к решению практических задач ввиду необычайной громоздкости вычислений. С созданием и совершенствованием электронно-вычислительных машин эта трудность была преодолена.

В дальнейшем теория аэрозольного рассеяния получила развитие в работах большого числа как советских, так и зарубежных ученых. Назовем только несколько имен: В. В. Шулейкин, К. С. Шифрин, Ван де Хюлст, Дейрменджан и многие другие. Фундамент же теории рассеяния на крупных частицах был заложен Ми. Завидная судьба у этой его работы: вот уже на протяжении 80 лет основы теории Ми используются во многих работах по теории рассеяния.

Как же происходит аэрозольное рассеяние? В чем состоит его отличие от рассеяния молекулярного?

Когда крупная частица попадает в переменное электромагнитное поле падающей волны, каждая ее молекула или атом, как и в случае молекулярного рассеяния, становится дипольным излучателем. Но процесс рассеяния теперь происходит значительно сложнее. Под влиянием поля падающей волны частица поляризуется. На нее действует не только поле падающей волны, но и многочисленные поля элементов, составляющих частицу. Молекулы и атомы крупной частицы „упакованы“ плотно, т. е. находятся близко друг от друга, и их нельзя считать независимыми излучателями рассеянного света, как это принималось при молекулярном рассеянии. Теперь необходимо учитывать интерференцию волн, рассеянных отдельными излучателями, имея в виду при этом, что свет, рассеянный каждой молекулой, отличается по фазе, состоянию поляризации и месту возникновения. Например, световая волна длиной 0,5 мкм (зеленый свет) падает на каплю облака радиусом 10 мкм. На диаметре такой капли „уложится“ около 40 длин волн зеленого света. Поэтому при рассеянии на крупной частице возбуждается бесконечно много вторичных волн рассеянного света. Амплитуды этих волн зависят от размера рассеивающих частиц.

В окончательной форме теории Ми свет, рассеянный крупной частицей, представляется суммой бесконечного медленно сходящегося ряда. Каждое слагаемое ряда представляет собой сложного вида функцию. Чем меньше размер частицы, тем меньше слагаемых можно учитывать при суммировании ряда. Если размер частицы становится менее $^1/_{10}$ длины волны, теория Ми переходит в теорию Рэлея. Таким образом, теория молекулярного рассеяния является частным случаем теории рассеяния Ми.

Количественные характеристики рассеянного света

Мы не будем останавливаться на довольно громоздкой математической стороне теории аэрозольного рассеяния. Приведем лишь некоторые формулы, его описывающие, и основные физические характеристики, вытекающие из теории. Сопоставим характеристики рассеянного света при молекулярном и аэрозольном рассеянии для объяснения ряда световых явлений, ими обусловленных.

Количественными характеристиками рассеянного света, как и любого электромагнитного излучения, являются: 1) спектральный состав, 2) общая

2 Зак. 809

яркость, или интенсивность, рассеянного света и его угловое распределение и 3) наличие поляризации и угловое распределение поляризационных характеристик (степени поляризации и положения плоскости поляризации).

Начнем со сравнения спектрального состава света, рассеянного при молекулярном и аэрозольном рассеянии. Удобной количественной характеристикой яркости, или интенсивности, рассеяния как при молекулярном, так и при аэрозольном рассеянии является *объемный коэффициент рассеяния*. Он представляет собой отношение светового потока, рассеянного единицей объема во всевозможных направлениях, к интенсивности светового потока, упавшего на этот объем.

Объемный коэффициент молекулярного рассеяния $\sigma_м$, входящий в знаменитый закон Рэлея, выражается формулой:

$$\sigma_м = \text{const}\,\frac{(n-1)^2}{N\cdot\lambda^4}, \qquad (2.1)$$

где λ — длина волны падающего света, N — число рассеивающих частиц в единице объема воздуха, n — показатель преломления воздуха, const — постоянная формулы.

Зависимостью коэффициента рассеяния от длины волны мы уже воспользовались в предыдущей главе для объяснения голубого цвета неба, красного цвета Солнца и Луны у горизонта, возникновения атмосферной дымки.

Сравним интенсивность рассеянного света для лучей трех длин волн: 1) видимых с длиной волны 0,5 мкм (зеленого света), 2) ультрафиолетовых —0,05 мкм и 3) инфракрасных —5,0 мкм. Из (2.1) следует, что ультрафиолетовые лучи будут рассеиваться в 10 000 раз сильнее, а инфракрасные в 10 000 слабее, чем видимые. Яркость воздушной дымки, за счет рассеяния, будет самой сильной для ультрафиолетовых, слабее у видимых и самой слабой у инфракрасных лучей. Именно поэтому наблюдение и фотографирование далеких предметов с самолета или другого летательного аппарата выгодно проводить в инфракрасных лучах — дальность видимости будет значительно больше.

Естественно было бы ожидать, что яркость рассеянного света будет тем больше, чем больше концентрация рассеивающих частиц в единице объема (N). Из (2.1) же следует, на первый взгляд, странный вывод, что $\sigma_м$ обратно пропорционален N. Дело в том, что в числитель (2.1) входит показатель преломления n, который, в свою очередь, прямо пропорционален N, и так как n входит в квадрате, то, в конечном итоге, получается ожидаемая зависимость: $\sigma_м$ прямо пропорционален N.

Из (2.1) следует также, что интенсивность рассеяния зависит, помимо концентрации рассеивающих частиц и длины волны падающего света, от показателя преломления рассеивающих частиц, т. е. от материала, из которого состоят частицы.

В отличие от молекулярного, рассеяние Ми для частиц, достаточно больших в сравнении с длиной волны, характеризуется слабой зависимостью яркости, или интенсивности, рассеянного света от длины волны. Объемный коэффициент аэрозольного рассеяния $\sigma_а$ для единицы объема воздуха, содержащего N крупных частиц радиуса a, выражается формулой

$$\sigma_а = \pi a^2 K(\rho, m) N, \qquad (2.2)$$

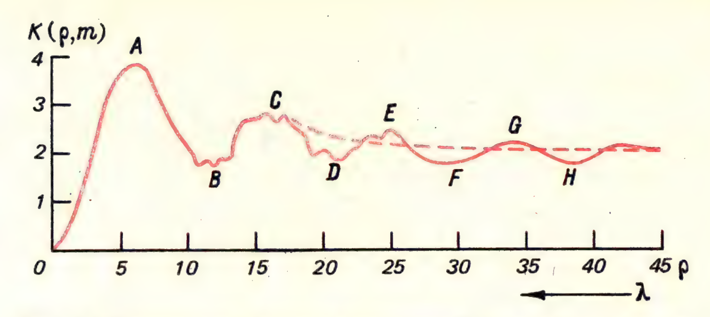


Рис. 2.1. Зависимость функции рассеяния $K(\rho, m)$ от параметра ρ.

где $K(\rho, m)$ — функция рассеяния, сложным образом зависящая от параметра ρ ($\rho = 2\pi a/\lambda$) и комплексного показателя преломления частицы m. Вид функции $K(\rho, m)$ для капелек воды показан на рис. 2.1.

Анализируя вид функции $K(\rho, m)$, мы сможем ответить, почему облака и туманы белые. Как видно из рис. 2.1, $K(\rho, m)$ имеет несколько максимумов и минимумов, постепенно затухающих. При больших значениях ρ функция $K(\rho, m)$ стремится к постоянной величине, равной 2. Это область так называемого нейтрального рассеяния, в которой все длины волн рассеиваются в одинаковой степени. Как видно из рисунка, эта область начинается со значений $\rho \approx 45$. Вычислим значение ρ для капель облака или тумана со средним радиусом 10 мкм. Для красных лучей (0,8 мкм) $\rho = 156$, для фиолетовых (0,40 мкм) $\rho = 78$. Таким образом, в облаках и туманах имеет место *нейтральное рассеяние*. Этим и объясняется их белый цвет. Постоянно наблюдаемое нами голубое небо и плывущие по нему белые облака наглядно иллюстрируют оба типа рассеяния: молекулярное и аэрозольное.

Видели ли вы голубую Луну или зеленое Солнце?

Воспользуемся рис. 2.1 для объяснения еще двух, более редко наблюдаемых световых явлений, обусловленных рассеянием на крупных частицах. Одно из них — это зеленый цвет Солнца в пустыне. Во время песчаных или пыльных бурь или после них, когда в воздухе содержится во взвешенном состоянии много мелких песчинок, Солнце становится зеленым, небо же, наоборот, принимает желтоватую или даже красноватую окраску.

Второе явление — голубой цвет Солнца или Луны при восходе или заходе. Голубым видели Солнце при восходе жители стран Западной Европы 26—28 сентября 1951 г., когда по Европе распространился дым от громадных лесных пожаров в Канаде, перенесенный воздушными течениями через Атлантику. Голубую восходящую Луну наблюдали на Гавайских островах в 1985 г. после извержения вулкана Мауна-Лоа. Такая окраска Солнца или Луны при восходе или заходе имела место и при других интенсивных вулканических извержениях взрывного типа.

Конечно, наблюдать, как восходит голубая Луна или голубое Солнце, не удается часто. О редкости этого явления говорит и английское разговорное выражение: „однажды при синей Луне".

Необычное изменение цвета Солнца на голубой наиболее часто происходит при низком положении светила на небосводе, когда его лучам приходится проходить через большие толщи воздуха. При этом рассеяние света интенсивнее „фильтрует" лучи разного цвета. Голубое Солнце можно увидеть и днем, если посмотреть на него через клубы пара, выходящие из парового котла в первые моменты, пока капельки еще достаточно мелкие.

В трех приведенных примерах преобладающий размер частичек песка, дыма или капелек воды был таков, что значение ρ, им соответствующее, приходилось на области спада кривой $K(\rho, m)$. Например, на любой из участков кривой: AB, CD, EF и т. д. В этих интервалах значений ρ (т. е. при таких соотношениях радиусов частичек и длины волны света) с увеличением длины волны (т. е. с уменьшением ρ) увеличивается интенсивность рассеяния света. В этих диапазонах значений ρ сильнее рассеиваются длинные волны (красные, оранжевые, желтые), а в прямом свете Солнца или Луны остаются преимущественно короткие (синие, голубые, зеленые).

Почему возможно применение радиолокации в облаках и туманах?

Изложенная теория рассеяния применима к любым электромагнитным волнам. Одни и те же рассеивающие частицы могут быть большими для одних длин волн и малыми для других. Например, капли облаков и тумана, завесы дождя являются большими для видимых и близких инфракрасных лучей, но малыми для радиоволн.

Наблюдения в облаках с самолетов, а также расчеты по моделям облака или тумана, построенным для наиболее часто встречающихся распределений капель по размерам и концентраций капель, показали, что дальность видимости в облаке обычно не превышает 200—300 м. Это означает, что направленный пучок световых лучей, проходя в облаке путь 200—300 м, полностью рассеивается. Для радиоволн те же капли облака или тумана оказываются малыми. Соответствующие им значения ρ попадают в диапазон от 0 до первого максимума (см. рис. 2.1). Поэтому радиоволны способны „пробить" значительно большую толщину слоя облака или тумана, что и используется в радиолокации.

Радиолокаторы широко применяются в морской и речной навигации. Благодаря радиолокаторам многие суда избежали печальной участи „Титаника", затонувшего в результате столкновения с айсбергом.

Индикатрисы рассеяния

Рассмотрим вторую характеристику рассеянного света — угловое распределение яркости рассеянного света при молекулярном и аэрозольном рассеянии.

Зависимость яркости рассеянного света от угла рассеяния принято изображать в виде полярной диаграммы, называемой индикатрисой рассеяния (рис. 2.2). Рассеивающая частица на рисунке помещена в центре

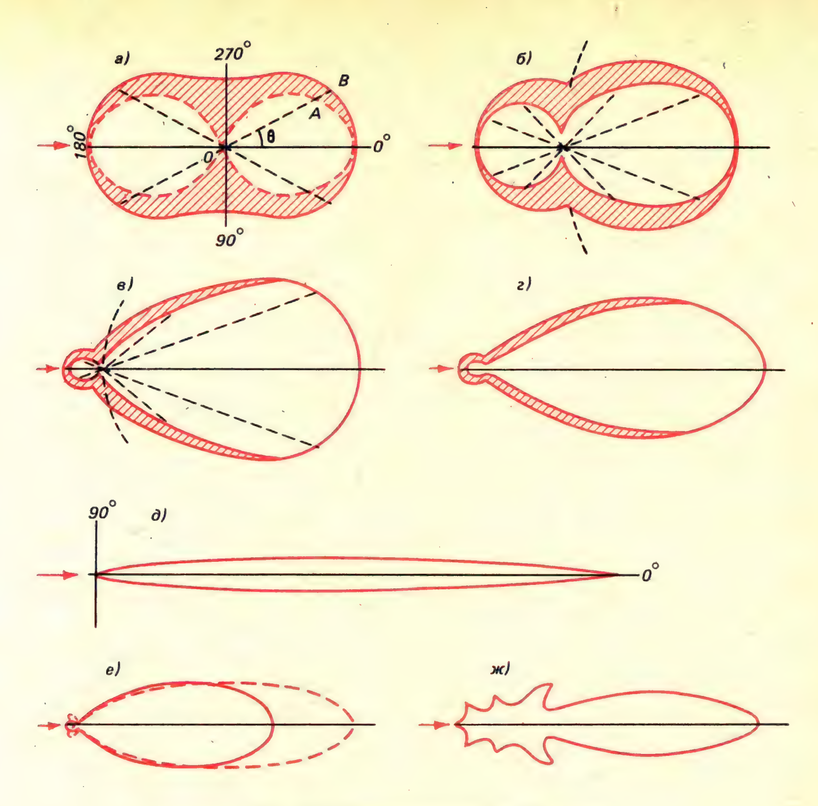


Рис. 2.2. Индикатрисы рассеяния.

а — при молекулярном рассеянии; *б* — для частиц диаметром, равным $^1/_3\lambda$; *в* — для частиц диаметром λ; *г* —— для частиц диаметром 3λ; *д* — для частиц диаметром 40λ; *е, ж* — с дополнительными максимумами (по О. Д. Бартеневой).

полярной диаграммы. Свет падает на частицу слева направо. Углы рассеяния θ отсчитываются от 0 до 360° против часовой стрелки. Длина радиуса-вектора от центра диаграммы до любой точки на индикатрисе рассеяния (внешней крибой) показывает в относительных единицах интенсивность света, рассеянного под этим углом. Поворачивая радиус-вектор вокруг точки *O* от 0 до 360°, мы получим представление о том, как изменяется яркость рассеянного света с изменением угла рассеяния.

При молекулярном рассеянии (рис. 2.2 *а*) интенсивность света, рассеянного вперед и назад (углы 0 и 180° соответственно), в два раза больше, чем в направлениях, перпендикулярных падению света, т. е. под углами 90 и 270°. В остальных направлениях интенсивность рассеянного света находится между этими двумя значениями.

Совсем иначе распределяется рассеянный свет вокруг крупной частицы. Прежде всего, теряется симметрия интенсивности рассеянного света, посылаемого вперед и назад. По мере укрупнения частицы основное количество рассеянного света направляется узким „языком“ вперед в направлении

падения света, т. е. сконцентрировано в области малых углов рассеяния, близких к направлению 0°. Назад (под углом 180°) рассеянный свет почти совсем не направляется (рис. 2.2 *б, в, г, д*). На еще более крупных частицах помимо основного максимума появляются дополнительные в виде выступов или „лепестков“ под различными углами рассеяния (рис. 2.2 *е, ж*).

Поляризация рассеянного света

Наконец, сопоставим третью характеристику рассеянного света — угловое распределение поляризации при молекулярном и аэрозольном рассеянии.

Степенью поляризации называется отношение интенсивности поляризованной части рассеянного света к общей интенсивности света, рассеянного в данном направлении. По теории Рэлея степень поляризации зависит только от угла рассеяния θ и выражается формулой

$$p = \frac{1 - \cos^2\theta}{1 + \cos\theta} \cdot 100\%. \qquad (2.3)$$

Снова обратимся к рис. 2.2. Внешние кривые на рисунке — индикатрисы рассеяния. Внутренние кривые отделяют поляризованный рассеянный свет (заштрихован) от неполяризованного. Определим, например, степень поляризации света, рассеянного под углом θ. Длина радиуса-вектора от центра диаграммы O до точки B индикатрисы OB представляет собой общую интенсивность света, рассеянного в этом направлении (под углом θ). Она складывается из двух долей: отрезка радиуса-вектора, лежащего в поляризованном свете, AB, и отрезка OA, лежащего в неполяризованном свете. По определению, степень поляризации

$$p = \frac{AB}{OB} \cdot 100\%. \qquad (2.4)$$

Рассмотрим сначала угловое распределение степени поляризации при молекулярном рассеянии (рис. 2.2 *а*).

Полная поляризация рассеяния света, при которой степень поляризации равна 100%, имеет место под углами рассеяния 90 и 270°. В этих направлениях весь радиус-вектор лежит в поляризованном свете. Под углами рассеяния 0 и 180° степень поляризации равна 0% (весь радиус-вектор лежит в неполяризованной части индикатрис). В остальных направлениях имеет место частичная поляризация, при которой степень поляризации больше 0, но меньше 100%.

При рассеянии на крупных частицах, как это видно из рис. 2.2 *б, в, г, д*, внутренняя кривая всюду разомкнута. Это означает, что нет такого направления, в котором рассеянный свет был бы полностью поляризован. С увеличением размера рассеивающих частиц степень поляризации во всех направлениях уменьшается (уменьшается заштрихованная часть индикатрисы рассеяния.

Есть и другие отличия поляризационных характеристик молекулярного и аэрозольного рассеяний.

Как степень поляризации рассеянного света, так и ее угловое распределение оказываются весьма чувствительными к изменению размера рассеивающих частиц. Эти их свойства используются в ряде прикладных методов исследования различных аэрозольных сред в промышленности и в косвенных и прямых методах исследования атмосферы с поверхности Земли и из космоса.

3. Небесный свод

Кристалл небес мне не преграда боле,
Разрушивши его, подъемлюсь в бесконечность.
Джордано Бруно

Что такое небесный свод?

В Древней Греции и Древнем Риме видимый небесный купол считали твердым сводом, закрывающим Землю сверху. По Клавдию Птолемею (II в. н. э.), небосвод представляет собой семь кристаллических сфер, по которым вращаются светила: Луна, Меркурий, Венера, Солнце, Марс, Юпитер и Сатурн. Позднее, в средние века, ученые схоласты спорили, из чего „сделан" небесный свод: из стекла, хрусталя или драгоценных камней синего цвета, например сапфира?

Правильное объяснение того, что же представляет собою небесный свод, дал в XV в. Леонардо да Винчи. В книге „О живописи" он писал: „Синева неба происходит благодаря толще освещенных частиц воздуха, которая расположена между Землей и находящейся наверху чернотой". Таким образом, вся толща атмосферы, освещенная солнечными лучами, и создает впечатление светлого купола небосвода. Однако и во времена Леонардо да Винчи и даже столетие спустя ученым, таким, как Джордано Бруно, Джулио Ванини, все еще приходилось бороться с догматами церкви и религиозными представлениями о Вселенной, разбивая представление о небе, как о „кристалле", т. е. чем-то твердом. Об этом свидетельствуют стихи Джордано Бруно, взятые в качестве эпиграфа главы.

Изменения цвета неба и его яркости

Окружающий нас воздух — совершенно бесцветный газ. Даже не очень чистый воздух приземного слоя атмосферы в городах оказывается необыкновенно прозрачным в сравнении с самой прозрачной жидкостью или с самым прозрачным оптическим стеклом. Если смотреть через слой воздуха толщиной в несколько метров, то мы не видим его совсем. Если толщина слоя достигает нескольких километров, мы видим воздушную дымку, которая затягивает удаленные предметы. Вся же атмосфера в целом создает светлый голубой купол небосвода. И происходит это благодаря ее огромной толще.

В атмосфере всегда происходит одновременно как молекулярное рассеяние, так и рассеяние на множестве разнообразных по размерам, форме и свойствам крупных частиц. Аэрозольное рассеяние, являясь по характеру нейтральным, накладывается на молекулярное и уменьшает степень синевы неба, одновременно увеличивая его яркость. Цвет неба и его яркость в любом направлении определяются: цвет — спектральным составом, яркость — общей интенсивностью рассеянного света, идущего из этого направления и создаваемого всеми молекулами и крупными частицами, сидящими на луче зрения в данном направлении.

Наибольшей синевой отличается небо в околозенитной области, где в рассеянии участвует минимальная толща воздуха и, кроме того, в этом направлении воздух более чистый. Поэтому рассеяние наиболее близко к молекулярному. С удалением от зенита увеличивается толща воздуха, участвующая в рассеянии, а соответственно и число крупных частиц на луче зрения, и рассеяние становится все более интенсивным. Кроме того, при рассеянии в большой толще воздуха возрастает роль многократного рассеяния, которое по характеру, как и аэрозольное, близко к нейтральному. Все это приводит к тому, что при увеличивающейся яркости голубизна неба уменьшается и на горизонте небо становится совершенно белесым. Все, по-видимому, замечали, что с увеличением замутнения атмосферы голубизна неба уменьшается во всех направлениях, а яркость увеличивается: это аэрозольное рассеяние „съедает“ синеву неба, делая его белесым и ярким.

Цвет неба и его яркость изменяются при поднятии над земной поверхностью. Чем выше мы поднимаемся, тем тоньше слой воздуха над точкой наблюдения, тем синее небо и тем меньше его яркость. Уже на вершинах гор высотою 4—5 км альпинисты любуются сине-голубым небом. Пассажиры самолетов ТУ-104 или ИЛ-18, совершающих рейсы на высоте 10 км, видят небо насыщенного синего цвета, стратонавты, поднявшиеся на стратостате „Осоавиахим-1“ на высоту 22 км, наблюдали темно-синий цвет неба. На высотах полета космических кораблей (более 100 км) небо выглядит совершенно черным.

Цвет неба и его распределение по небосводу измеряются с помощью специальных приборов — цианометров (от латинского „цианус“ — синий). Первый цианометр был сконструирован О. Б. Соссюром еще в конце XVIII в. Цианометр Соссюра состоял из 53 полосок бумаги, окрашенных берлинской лазурью в различные цвета: от почти черного к насыщенно-голубому и далее к светло-голубому. Соссюр проводил измерения цвета неба в Женеве, Шамони, на г. Монблан. В XIX в. применялись цианометры усовершенствованных конструкций: поляризационный цианометр Араго, урано-фотометр Вильда. Позднее большая серия измерений цвета неба была проведена Г. А. Тиховым в Пулкове (под Ленинградом) с помощью спектроскопического цианометра и в Алма-Ате — сапфирового цианометра.

Распределение яркости по безоблачному небу

Рассмотрим распределение яркости по ясному небу. Оно характеризуется индикатрисой рассеяния, создаваемой всей толщей воздуха, т. е. всей атмосферой. Общая индикатриса рассеяния должна как бы просуммировать в каждом направлении свет за счет молекулярного рассеяния и рассеяния

на крупных частицах разных размеров. Такую общую индикатрису называют *абсолютной индикатрисой рассеяния*, рассчитанной на всю высоту атмосферы, или *индикатрисой яркости*. Ее вид определяет характер распределения яркости по небосводу. До сих пор мы говорили главным образом об однократно рассеянном свете. В действительности в атмосфере свет, один раз рассеянный, может рассеиваться во второй, в третий раз и т. д. Иными словами, свет испытывает многократное рассеяние в атмосфере, и все компоненты многократного рассеяния также участвуют в создании яркости неба. Увеличивает яркость неба и земная поверхность: отражая часть упавшего на нее солнечного и рассеянного света, она направляет его снова в атмосферу, где он принимает участие в повторном рассеянии.

Итак, полная яркость неба B в любом направлении складывается из трех компонент

$$B = B_1 + B_2 + B_A, \tag{3.1}$$

где B_1 — яркость за счет первичного рассеяния, B_2 — яркость за счет многократного рассеяния и B_A — яркость, создаваемая светом, отраженным от земной поверхности. Каково соотношение этих компонент?

При высокой прозрачности атмосферы и малом альбедо, т. е. малой отражательной способности подстилающей поверхности основную роль в создании яркости неба играет рассеяние первого порядка. При коэффициенте прозрачности атмосферы более 0,85 вклад вторичного рассеяния в яркость неба вдали от горизонта составляет всего несколько процентов.

При увеличении мутности атмосферы существенно возрастает роль многократного рассеяния. При коэффициенте прозрачности 0,6—0,7 вклад вторичного рассеяния уже превышает 50%. Это в видимой области спектра. В ультрафиолетовой области, для лучей которой даже при самой высокой прозрачности атмосферы коэффициент прозрачности не превышает 0,2, многократное рассеяние всегда вносит основной вклад в создание яркости неба.

Заметную роль в увеличении яркости неба начинает играть свет, отраженный от земной поверхности, если ее альбедо велико, например, в случае, когда она покрыта снегом.

Над открытыми водными поверхностями в полярных районах небо заметно темнее, чем над снежными или ледяными. По измерениям около о. Шпицберген средняя яркость „*водяного*“ неба при слоистых формах облаков составляет около 40—44% яркости „*снежного*“ неба. Яркость безоблачного „водяного“ неба и того меньше: при высоте Солнца 30° она составляет только 20% яркости „снежного“ неба.

Измеряя высоту границы на небосводе между „снежным“ и „водяным“ небом, можно определять расстояние по суше до открытой воды или снежной поверхности. Таким методом пользуются в арктических районах; он дает ошибку не более 10%.

На яркость небосвода, кроме степени замутнения атмосферы и альбедо Земли, большое влияние оказывает высота Солнца. Отметим лишь некоторые особенности распределения яркости, которые постоянно имеют место при любом положении Солнца на небосводе и всех состояниях атмосферы.

Околосолнечный ореол

Основной максимум яркости неба всегда наблюдается около Солнца. Это так называемый околосолнечный ореол. Он представляет собой довольно яркое, белесого цвета кольцо на безоблачном небе вокруг Солнца. Угловая ширина кольца до 10—12°. Голубое небо начинается за пределами ореола. Чтобы наглядно представить себе размер ореола, вспомним, что угловой диаметр Солнца немного больше полуградуса (32′). Таким образом, на ширине ореола „уложится“ до 20 солнечных дисков.

Как же возникает ореол вокруг Солнца? Он порождается резко выраженным максимумом интенсивности рассеяния света, направленным вперед, что хорошо видно на индикатрисе рассеяния на крупных аэрозольных частицах в атмосфере. При любом положении Солнца на небосводе, когда мы посмотрим на него, индикатрисы всех крупных частиц, „сидящих“ на этом луче зрения, обращены к нам своими вытянутыми вперед „носами“. Таким образом, максимальное количество рассеянного света идет к наблюдателю из очень небольшого телесного угла, заключающего (или охватывающего) только „носы“ индикатрис. Наблюдатель не видит каждой аэрозольной частицы в отдельности и относит все явления на небосвод, как на экран, поэтому ему кажется, что этот яркий рассеянный свет исходит от небольшой части небосвода, примыкающей к солнечному диску в виде кольца.

В отсутствие облаков околосолнечный ореол виден практически всегда. Его нет только в очень чистом воздухе высоко в горах, при наблюдении с самолетов или с летательных аппаратов. В этих случаях солнечный диск окружен небом насыщенного голубого цвета.

Если спросить многих людей, видели ли они когда-нибудь околосолнечный ореол, вероятно, большинство ответят отрицательно. Почему же не видели? Что мешает его наблюдению? Увидеть ореол, особенно при высоком положении Солнца на небосводе, действительно трудно — мешает слепящая яркость самого солнечного диска. Поэтому, если вы хотите увидеть ореол вокруг Солнца, закройте диск Солнца двумя сомкнутыми пальцами (например, указательным и средним) вытянутой вверх руки. Ореол удобно наблюдать и через слегка закопченное или дымчатое стекло.

Чем более замутнена атмосфера, тем ярче околосолнечный ореол.

Второй максимум яркости небосвода — *пригоризонтный*. Он обусловлен увеличением толщи атмосферы, участвующей в рассеянии, при приближении

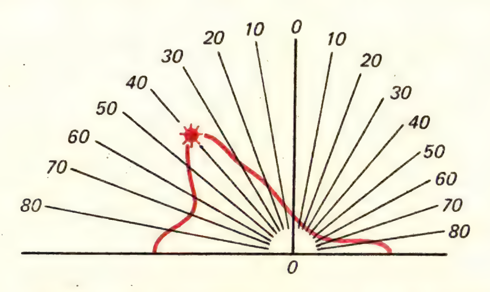


Рис. 3.1. Распределение яркости по небесному своду в вертикале Солнца.

к горизонту (рис. 3.1). Минимум яркости неба находится в солнечном зените. Эта точка лежит в вертикале Солнца* на угловом расстоянии от него 90°, когда Солнце на горизонте, и на несколько меньшем расстоянии при поднятии Солнца.

Поляризация небесного свода

Представим себе, что атмосфера идеально чистая и сухая и поэтому в ней происходит только молекулярное рассеяние. Солнце находится на горизонте. Каким должно быть распределение степени поляризации по небосводу, согласно формуле (2.3)? Степень поляризации должна быть равной 0% в направлении на Солнце ($\theta = 180°$) и на антисолярную точку ($\theta = 0°$). В направлении на зенит ($\theta = 90°$) она должна составлять 100%.

В действительности эта формула выполняется в самом грубом приближении только в областях неба, далеких от Солнца и от горизонта, даже при очень высокой прозрачности атмосферы. Фактически наблюдаемая картина распределения степени поляризации по небосводу довольно сложная. Оказывается, на небе не две точки, как предсказывает теория Рэлея, в которых степень поляризации равна нулю, а четыре. Их назвали *нейтральными точками*. Только от этих четырех точек небосвода рассеянный свет оказывается совсем не поляризованным (естественным). Весь остальной небосвод посылает рассеянный свет частично поляризованный, с разной степенью и с разным положением плоскости поляризации.

Нейтральные точки носят имена ученых, их впервые обнаруживших. Это точки: Араго (*A*), Бабине (*Ba*), Брюстера (*Br*) и IV точка, которую „открыли" позднее остальных уже при наблюдении с высотных самолетов. Все нейтральные точки располагаются в плоскости солнечного вертикала, точки *Ba* и *Br* над и под Солнцем, точки *A* и IV над и под антисолярной точкой (рис. 3.2).

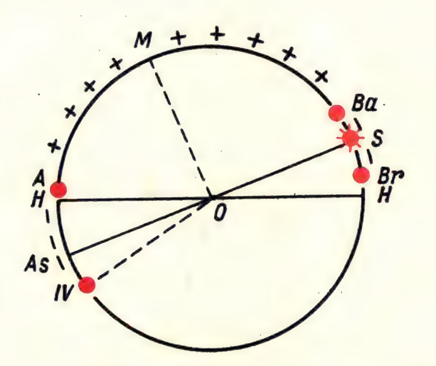


Рис. 3.2. Нейтральные точки небосвода.

* Плоскостью солнечного вертикала называется вертикальная плоскость, проходящая через Солнце, зенит места наблюдения и наблюдателя.

Расстояние нейтральных точек от Солнца и антисолярной точки не остается постоянным, оно изменяется от 12 до 30° в зависимости от высоты Солнца, степени замутнения атмосферы, альбедо земной поверхности и длины волны света. При средней мутности атмосферы и низком Солнце это расстояние составляет 16—18°.

При поднятии Солнца точки *Ва* и *Br* приближаются к Солнцу, а *А* и IV — к антисолярной точке и вместе с нею уходят под горизонт. При увеличении мутности атмосферы или альбедо Земли нейтральные точки удаляются от Солнца и антисолярной точки.

Максимальная степень поляризации наблюдается в зените при положении Солнца на горизонте или при небольшом угле погружения под горизонт. По мере поднятия Солнца область максимальной поляризации уходит из зенита, оставаясь вблизи солнечного зенита.

Максимальная измеренная степень поляризации нигде, ни при каких условиях наблюдения не достигала 100%. Приведем максимальные значения, отмеченные за многолетние периоды систематических измерений в разных точках Советского Союза: в Павловске (под Ленинградом) 82%, в Свердловске 83,7%, в Крыму на г. Ай-Петри 84,7%.

В чем же причина таких низких значений максимальной степени поляризации по сравнению с теоретическими предсказаниями? Причин несколько. Во-первых, это постоянное присутствие в атмосфере аэрозоля, рассеяние на котором, как уже говорилось, заметно уменьшает степень поляризации во всех направлениях и тем сильнее, чем крупнее частицы аэрозоля и чем их больше. Во-вторых, это многократное рассеяние света, также всегда происходящее в атмосфере. Свет, рассеянный многократно, оказывается менее поляризованным по сравнению с однократно рассеянным. Поэтому „добавка" многократного рассеяния в общий пучок рассеянного света, идущего из любого направления, увеличивает его яркость и одновременно снижает степень поляризации. Есть и третья причина — это некоторые особенности в строении молекул основных газов, составляющих воздух (так называемая анизотропия молекул), которые снижают степень поляризации примерно на 5%.

Распределение положения плоскости поляризации по небосводу сильно изменяется с увеличением высоты Солнца и мутности атмосферы.

Степень поляризации небосвода чувствительно реагирует на всякое уменьшение прозрачности воздуха, вызванное, например, большими по площади лесными или степными пожарами. Особенно резкое снижение степени поляризации наблюдалось после мощных извержений вулканов взрывного типа: Кракатау в 1883 г., Катмая в 1912 г., Агунга в 1963 г. и других. Максимальная степень поляризации над обширными площадями земного шара, и не только в районе извержения, а и в других частях света, не превышала 50%. Пониженная по сравнению с „нормой" степень поляризации держалась на протяжении одного-двух лет после извержения. Вскоре после извержений появлялись четыре новые нейтральные точки: две слева и справа от Солнца и две аналогично около антисолярной точки. Эти точки также наблюдались в течение одного-двух лет.

Положение максимумов и минимумов синевы, поляризации и яркости неба

Три основные характеристики рассеянного света, поступающего от небосвода,— степень синевы, поляризация и яркость тесно связаны между собой. Распределение синевы и степени поляризации в общих чертах обратные распределению яркости. При увеличении толщи воздуха (оптической массы), участвующей в рассеянии в любом направлении, возрастает роль аэрозольного и многократного рассеяния по сравнению с молекулярным. Аэрозольное и многократное рассеяние „работают" на яркость и, следовательно, против синевы и степени поляризации. Поэтому там, где яркость неба максимальная — в области околосолнечного ореола и у горизонта, степень поляризации и синевы минимальные. Напротив, в околозенитной области, а при поднятии Солнца — в солнечном зените яркость минимальная, а степень поляризации и синева максимальные. При появлении даже самых тонких высоких перистых облаков мгновенно уменьшается степень поляризации, одновременно увеличивается яркость неба. Когда на небе много облаков среднего или нижнего яруса, таких, как слоисто-кучевые или высоко-кучевые, а Солнце светит в просвет между ними, небо становится таким ярким, что без темных очков на него невозможно смотреть. Рассеянный свет, исходящий от нижней границы мощных кучевых или кучево-дождевых облаков, оказывается совершенно неполяризованным.

Форма небесного свода

Городские жители лишены возможности видеть небосвод во всей его красе: ночью — огромный темный купол с бесчисленными звездами, днем — бездонное голубое небо, а в сумерки — полыхание красок зари. Думаю, что многие школьники в городах ни разу в жизни не видели, как восходит Солнце и каким великолепием тонов встречает небо его появление. Что видят жители городов вместо небосвода? Только узкие „щели" неба вдоль улиц!

О том, что Земля имеет шарообразную форму, знают все, еще из школы. А задумывались ли вы когда-нибудь, какую форму имеет небо? Думаю, что большинство опрошенных ответит, что, по-видимому, форму полусферы!

Попробуйте, оказавшись за городом, на открытой местности в поле, а особенно хорошо в море, окинуть взглядом небосвод от зенита до горизонта. Вы убедитесь, что небо — далеко не полусфера! Небосвод скорее напоминает опрокинутую чашу или даже, иногда, блюдце! Так сильно он приплюснут в вертикальном направлении.

Сплюснутость неба не остается постоянной. Она изменяется в зависимости от освещенности и от облачности. Так, днем небо кажется более сплюснутым, чем ночью, при сплошном облачном покрове — сильнее, чем при ясном небе. Когда же все небо затягивают плотные низкие облака, тогда небо и выглядит как опрокинутое на Землю блюдце.

Попробуем оценить количественно степень сплюснутости небосвода. На рис. 3.3 наблюдатель находится в точке O. Представьте себя на месте этого наблюдателя. Пробегите взглядом по небу от зенита (Z) до горизонта (H) и мысленно отыщите точку M, расположенную так, чтобы отрезки дуги от зенита до точки M (ZM) и от точки M до горизонта (MH) были одинаковыми.

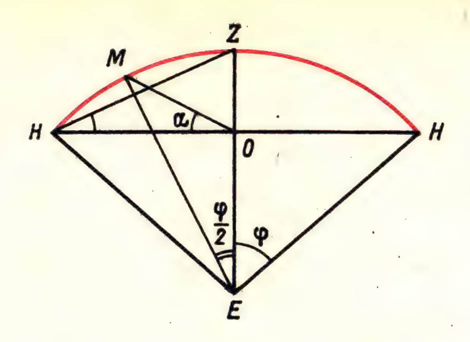


Рис. 3.3. Сплюснутость небесного свода.

Теперь любым угломерным прибором, например транспортиром с циркулем, измерьте высоту точки M над горизонтом, т. е. угол α. Только еще раз подчеркиваем, что делить пополам надо дугу ZH, а не угол ZOH. Если бы небо было полусферой, то угол α был бы равным 45°. В действительности же оказывается, что угол α значительно меньше — его величина изменяется от 18 до 30°.

Главной причиной изменения степени сплюснутости небесного свода является изменение освещенности земной поверхности. Известную роль играет характер облачности. Днем, при ясном небе и большой освещенности, угол α составляет 20—22°. В лунную ночь α увеличивается до 30°. В темную безлунную ночь форма небесного свода меньше всего отличается от полусферы. Угол α приближается к 40—44°. Сплюснутость неба усиливается с увеличением количества облаков. При сплошном, плотном покрове облаков небо кажется совсем приплюснутым, угол α уменьшается до 18°.

Оптические иллюзии, обусловленные формой небесного свода

Приплюснутая форма небесного свода приводит к возникновению ряда зрительных обманов. Прежде всего, это кажущееся увеличение размеров Солнца, Луны, созвездий и других объектов на небосводе, находящихся близко к горизонту.

Все, наверное, обращали внимание на то, что, когда Солнце поднимается из-за горизонта или, наоборот, опускается к нему, оно кажется очень большим. При высоком положении на небосводе, например летом в околополуденные часы, Солнце совсем маленькое, примерно в три-четыре раза меньше. Точно так же Луна и созвездия у горизонта кажутся в два-три раза больше, чем в верхней кульминации. Угловые размеры всех объектов на небосводе кажутся увеличенными, если они располагаются ниже 35° и, наоборот, уменьшенными при их высоте более 35° над горизонтом.

Аналогично тому, как мы переоцениваем размеры Солнца и Луны у горизонта, мы переоцениваем количество облаков, если они находятся в основном вблизи горизонта, и недооцениваем, если они разбросаны в околозенитной части неба.

Здесь следует сказать, что количество облаков (балл облачности) — один из основных метеорологических элементов, сведения о котором передаются по нескольку раз в сутки со всей многотысячной сети метеорологических станций мира, и он не измеряется приборами, а оценивается визуально. Метеорологи в своей повседневной работе, определяя балл облачности, привыкли учитывать этот оптический обман. Если же балл облачности оценивает неподготовленный человек, новичок в этом деле, расхождения с данными опытного наблюдателя могут быть в несколько баллов!

Сплюснутая форма небосвода приводит и к другой оптической иллюзии. Мы завышаем не только кажущиеся размеры Солнца, Луны, созвездий, облаков и других объектов у горизонта, но и их высоту над горизонтом.

Мы привыкли считать, что летом, в полуденное время, даже в средних широтах Солнце стоит почти в зените. На самом деле максимальная высота Солнца летом в полдень в Ленинграде не превышает 54°, в Москве 57°, в Одессе 68°. Даже зимой, когда полуденная высота Солнца в Ленинграде в январе — феврале составляет только 10—15°, нам кажется, что Солнце стоит значительно выше.

Так же мы переоцениваем и высоты облаков на небосводе. Например, отдельные облака находятся над горизонтом на высотах 5, 10 и 30°, нам же кажется, что их высота значительно больше. Мы неправильно оцениваем высоты и других явлений, наблюдаемых на небосводе: загорания метеоритов, полярных сияний, полета самолетов и т. п.

Об этом оптическом обмане писал в своей „Метеорологике“ еще Аристотель, однако научное объяснение было дано ему значительно позже, в XI в., арабским ученым Альгазеном (Абу Али Хайсамом).

Попробуем объяснить, как возникает иллюзия увеличения размеров всех предметов у горизонта. На рис. 3.4 изображен небосвод и Луна на разных высотах над горизонтом. Как говорилось выше, зрительно мы не чувствуем, что Солнце находится далеко от Земли, а Луна значительно ближе. Все, что мы видим в небе, мы проецируем на него, как на экран. Из-за сплюснутости неба этот экран оказывается от нас далеким в направлении на горизонт и значительно более близким в направлении на зенит. Угловой диаметр как Солнца, так и Луны при любом их положении на небе одинаков (32′), а вот линейные размеры при проектировании на близкий экран (в зените) кажутся маленькими, а при проектировании на далекий экран (у горизонта) — большими.

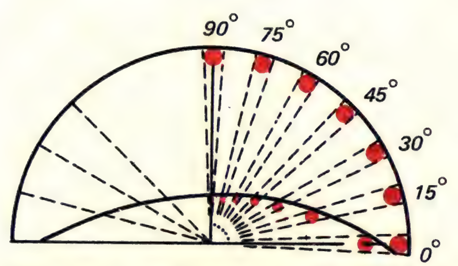


Рис. 3.4. К объяснению кажущегося увеличения Луны у горизонта.

Читатель может легко убедиться сам, что Луна только кажется большой у горизонта, что это самый настоящий зрительный обман. Проделайте следующий эксперимент. Держите сложенные вместе три спички в вытянутой перед собой руке. Для человека среднего роста расстояние спичек от глаза составляет примерно 75 см, а поперечник спичек 6 мм. Спички закрывают на небосводе угол около $^1/_2$°, т. е. равный диаметру Луны или Солнца. Закройте Луну спичками при ее высоком положении на небосводе, когда она кажется маленькой, а затем еще раз, когда она опустится к горизонту и будет казаться в несколько раз больше. К своему удивлению, вы обнаружите, что спичками можно закрыть Луну при любом ее положении, т. е. что размер Луны не изменяется.

Существует и другое объяснение этого зрительного обмана. Всем хорошо известно, что чем дальше от нас на земной поверхности находится любой предмет, тем под меньшим углом мы его видим. Это явление перспективы. Луна находится от Земли на расстоянии очень большом (384 000 км) по сравнению с расстояниями до наземных предметов, и при ее приближении к горизонту видимого уменьшения ее размеров не происходит. Мы же зрительно ожидаем, что размер Луны при ее опускании к горизонту должен уменьшиться, как у всех видимых в поле зрения предметов у горизонта. Поскольку этого не происходит, то создается впечатление, что Луна становится больше, чем ей следовало быть. Она кажется больше не потому, что в действительности увеличивается, а потому, что не сокращается в размерах, как остальные предметы. В пользу такого объяснения говорит следующий эксперимент. Сделайте длинную, например, картонную трубку и посмотрите через нее на низко стоящую Луну. Неожиданно обнаружится, что Луна уменьшилась до обычных размеров, потому что мы не видим теперь других предметов у горизонта и их перспективного уменьшения. Уберите трубку, и Луна снова становится большой!

Следует признать, что и в настоящее время до конца не исследовано, почему небесный свод имеет такую форму и как объясняется кажущееся увеличение Солнца, Луны, облаков и других предметов на небосводе у горизонта. Вероятно, большую роль играют психофизиологические особенности нашего зрения. Если мы смотрим вверх, не поднимая головы, то все предметы кажутся нам уменьшенными по сравнению с тем, какими они кажутся на том же расстоянии по горизонтали. Например, человек, стоящий на парашютной вышке высотою 75 м, кажется совсем маленьким, но этот же человек на расстоянии 75 м на Земле от нас — большим. Другой пример. Найдите вечером звезду на небе, которая, как вам кажется, находится около зенита. Повернитесь вполоборота и посмотрите на ту же самую звезду. Вы увидите, что она совсем не в зените, ее высота не более 70°.

На видимую форму небосвода оказывают влияние и другие причины, тоже связанные с психологией зрительного восприятия. Когда мы смотрим в вертикальном направлении, то не видим никаких объектов между глазом наблюдателя и небосводом, в горизонтальном же направлении обычно виден ряд предметов на разных расстояниях, в том числе и очень удаленных. Это способствует восприятию повышенной удаленности небосвода у горизонта. Воздушная дымка, окутывающая сильнее далекие предметы, также способствует восприятию горизонта как более далекого. Известную роль могут играть также разная освещенность, яркость и цвет неба в этих направлениях, наличие облаков разных форм или их отсутствие.



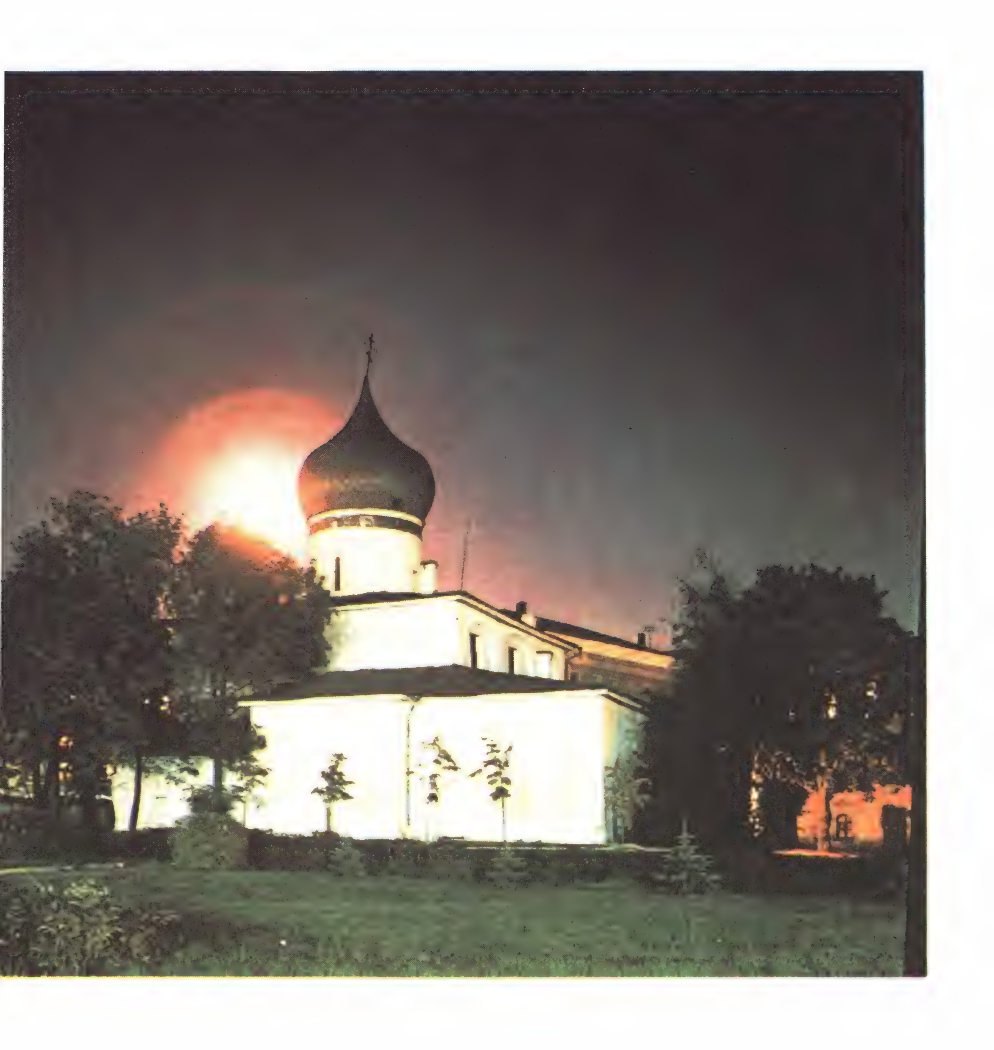
Голубое небо и белые облака наглядно иллюстрируют два типа рассеяния — молекулярное и аэрозольное. (Фото В. В. Маншеньюана)



Закат Солнца. Солнце большое, красное, сплющенное. (Фото В. П. Мельникова)

Солнце — главный источник света на Земле. (Фото В. Я. Денисова)





Большой венец вокруг Луны с добавочным кольцом. Большой радиус венца говорит о малых размерах капель или кристаллов, его образовавших. (Фото В. П. Мельникова)

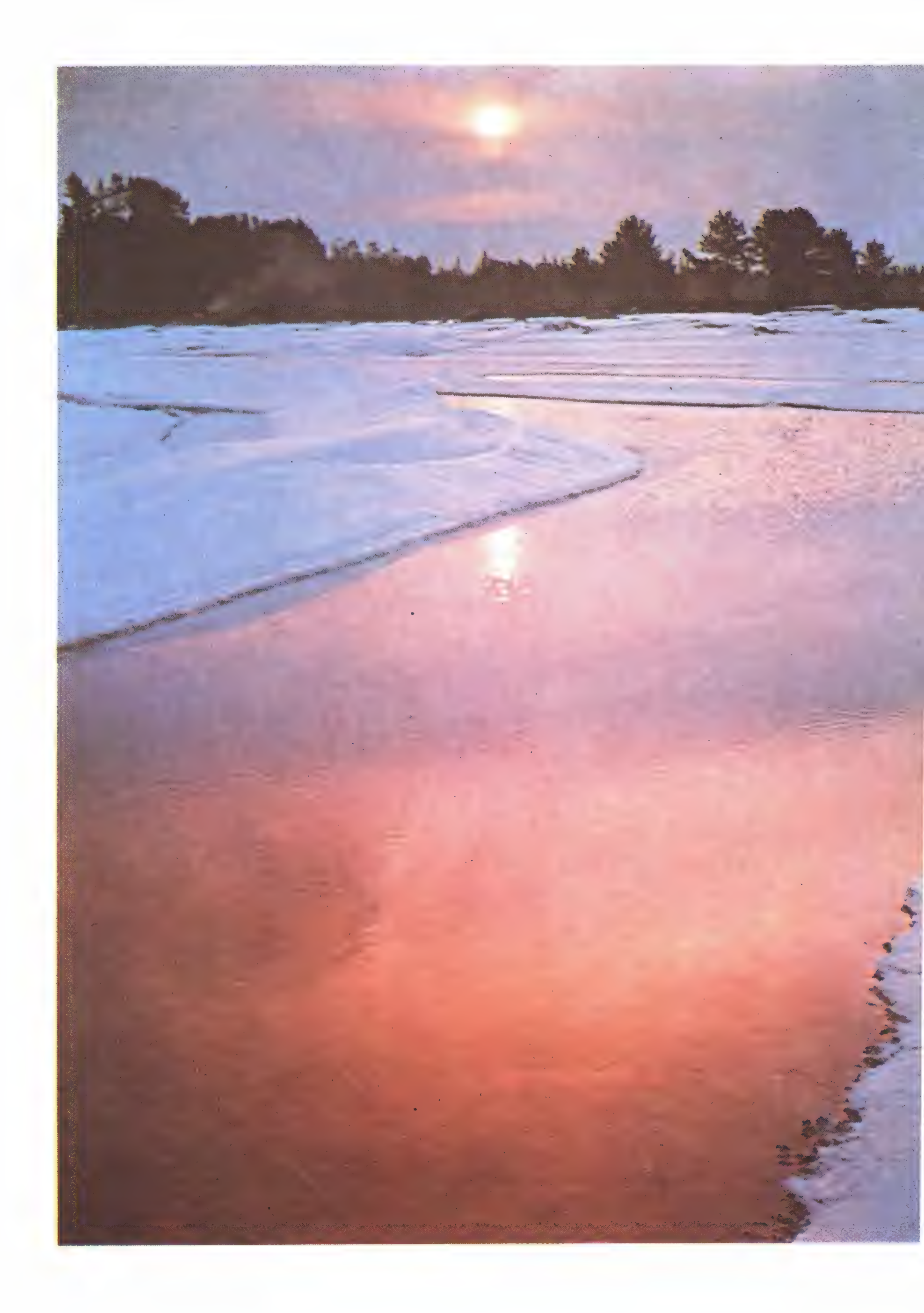
Ярко окрашенная первая радуга и более слабо окрашенная и широкая вторая радуга. С фиолетовых краев радуг видны добавочные дуги. (Фото В. П. Мельникова)





Освещенность в яркий солнечный день. (Фото В. В. Маншеньюана)

Голубой снег. Ландшафт снят в тот момент, когда Солнце внезапно закрылось облаком и заснеженное поле, будучи освещенным только светом от ясного неба, кажется совершенно синим. (Фоторепродукция В. П. Мельникова)





Глория на облачном покрове. Вид из космоса. (Фото А. Кулешова по рис. художника А. К. Соколова)

Атмосферные „усы“ на фоне ночного свечения атмосферы. (Фото А. Кулешова по рис. художника А. К. Соколова)





Слои ночного свечения атмосферы. Когда корабль находится на ночной части витка, на фоне темного космического неба отчетливо видны два светящихся слоя. (Фото А. Кулешова по рис. художника А. К. Соколова)



Зодиакальный свет, наблюдаемый из космоса. (Фото А. Кулешова по рис. художника А. К. Соколова)



Мощное полярное сияние, сквозь которое пролетали космонавты на космическом корабле. (Фото А. Кулешова по рис. художника А. К. Соколова)

Яркое полярное сияние, наблюдаемое с Земли. (Фоторепродукция В. П. Мельникова из журнала *Sky and telescope*)





Вечерняя заря в Ленинграде. (Фото В. Я. Денисова)

Окрашивание облаков во время зари. (Фото В. П. Мельникова)





„Море“ одуванчиков. Цвет каждого предмета определяется цветом смеси отражаемых им лучей. Одуванчики отражают больше всего желтых лучей, трава — зеленых, куртка на ребенке — красных. (Фото В. В. Маншеньюана)

4. Венцы, глории, нимбы

> Нельзя проводить грань между большим и малым, ибо то и другое одинаково важно для единого целого.
>
> *Н. Бор*

Венцы

Посмотрите на заднюю обложку книги. Луна, окруженная ярким красным ореолом, просвечивает сквозь тонкую пелену облаков. Мороз около 30° С. В воздухе, медленно опускаясь, искрятся кристаллики льда. Оседая на мельчайших ветках деревьев, они образуют причудливые серебристые подвески, сверкающие бриллиантовой пылью. По народному выражению, это „лють летит!“ Пушистый осадок на тонких веточках деревьев и кустарника часто называют инеем, хотя его правильное название „изморозь“.

Яркое кольцо на снимке, окружающее Луну, называется *венцом*. Когда Солнце или Луна просвечивают сквозь тонкие облака, состоящие из водяных капель или кристаллов, они часто кажутся окруженными голубоватым сиянием в виде кольца, непосредственно примыкающего к диску светила и оканчивающегося наружным красным краем. Это так называемый *ореол* или *венец* первого порядка. За ореолом следуют концентрические с ним венцы второго, третьего и следующих порядков, разделенные темными промежутками. Расположение цветов во всех кольцах одинаковое: внутренний край синевато-зеленоватый переходит в желтый, оранжевый и кончается наружным красным краем. Обычно виден только один ореол; иногда число колец доходит до трех-четырех. Размеры венцов бывают самыми различными. Чаще всего угловой радиус красного края ореола изменяется от долей градуса до 4—5°.

Венцы, как правило, образуются в таких капельно-жидких облаках, как тонкие высоко-кучевые и слоисто-кучевые. Из кристаллических облаков чаще всего дают венцы перисто-слоистые, иногда перисто-кучевые.

Венцы называют *малыми кругами* вокруг Солнца или Луны, в отличие от больших кругов гало, размер которых составляет 22°, 46° и более. Они одинаково часто появляются вокруг Солнца и Луны, однако в ярком свете Солнца и неба вокруг него венцы плохо различимы. Их можно видеть через закопченное стекло, дымчатые очки или наблюдая отражение Солнца в спокойной воде.

Венцы в облаках, состоящих из капелек (высоко-кучевых и слоисто-кучевых), не очень красивы. Обычно виден только один ореол, в виде голубовато-белого сияния, даже красный край плохо заметен. Это объясняется наличием в этих облаках капелек разного размера. Каждый размер дает свой венец, накладываясь друг на друга, венцы капель разного размера „смазывают“ картину. В кристаллических облаках (перистых и перисто-слоистых) кристаллы ближе по размерам друг к другу, и цвета в венцах получаются более чистыми и яркими. Ореол сопровождается несколькими добавочными кольцами.

Вокруг искусственных источников света также могут появиться венцы. Например, вокруг уличных фонарей в туманную погоду. Или другой пример.

3 Зак. 809

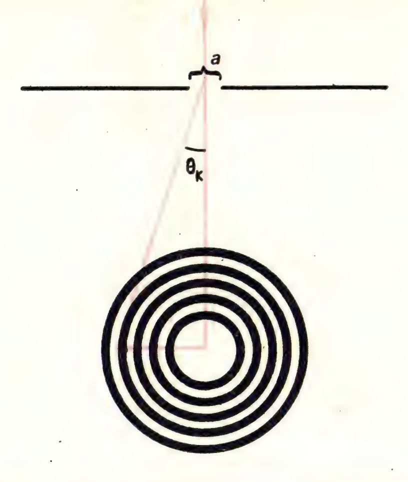


Рис. 4.1. К объяснению дифракции света на каплях или кристаллах облака.

Вы едете в холодную погоду в плохо освещенном трамвае или троллейбусе, стекла которого запотели или покрыты морозными узорами. Когда трамвай проходит мимо ярких уличных фонарей, на его стеклах мгновенно появляются, как бы вспыхивают, яркие венцы.

Венцы вокруг Солнца и Луны возникают за счет однократного рассеяния, или дифракции, лунного и солнечного света на капельках или кристалликах облаков. Распределение яркости в венцах описывается теорией дифракции вокруг малых отверстий (капелек) или узких щелей (кристалликов) (рис. 4.1).

Размер венцов определяется средними размерами капелек или кристалликов облака. Для капельно-жидких облаков эта связь наглядно видна в простой эмпирической формуле:

$$\sin \theta_k = (k + 0{,}22)\,\frac{\lambda}{2a}\,. \qquad (4.1)$$

Для кристаллических облаков (из теории дифракции вокруг щели) имеет место аналогичного вида формула:

$$\sin \theta_k = \frac{k\lambda}{d}\,. \qquad (4.2)$$

В этих формулах k — номер кольца ($k = 1,\ 2,\ 3...$), θ_k — угловой радиус кольца номер k, d — толщина кристаллика, λ — длина волны, a — радиус капелек облака.

Измерив размер венца, мы можем установить средний размер капелек или кристалликов облака. Наблюдая за изменениями размеров венцов (увеличиваются их размеры или уменьшаются, т. е. венцы „стягиваются“), можно судить о том, что происходит с элементами облака: укрупняются они или испаряются.

Формулы (4.1, 4.2) описывают положение темных колец (минимумов яркости). Но невозможно установить, где в темном кольце лежат минимумы (т. е. отсутствие света), соответствующие различным цветным лучам. Поэтому при проведении лабораторных экспериментов и при наблюдении в естественных условиях для определения среднего радиуса капель или толщины кристаллов облака (тумана) поступают следующим образом. Любым угломерным прибором (годится даже транспортир с циркулем) измеряется угловой радиус красного края кольца номер k, т. е. θ_k (желательно самого большого). Считают, что сразу за красным краем кольца лежит минимум некоторого условного „белого“ света с длиной волны 0,57 мкм, равной среднему арифметическому из длин волн красного (0,70 мкм) и синего (0,45 мкм). Эта длина волны 0,57 мкм всегда и подставляется в (4.1).

Известен ряд других явлений, родственных венцам и имеющих одинаковое с ними дифракционное происхождение.

Глории

Глория представляет собой одно или несколько ярких радужных концентрических колец вокруг тени самолета, отбрасываемой на нижележащее облако. Дословно „глория“ означает „сияние“, „ореол“.

Опишем глорию, которую наблюдали космонавты В. В. Коваленок и А. С. Иванченков с орбитальной станции „Салют-6“ 2 октября 1978 г. Глория в виде радужного ореола, заканчивающегося оранжево-красным краем, образовалась вокруг направления тени орбитальной станции на облачный покров. При высоте полета станции 300—400 км и размерах станции несколько десятков метров тень видимых (разрешаемых глазом) размеров на поверхности облачного покрова не могла образоваться. Было только направление на тень станции. Глория перемещалась по облачному покрову вместе со станцией, при этом ее размер немного изменялся, составляя в среднем 1—2°.

Брокенский призрак

Явление, аналогичное глории, можно наблюдать в горах вокруг тени человека, падающей на вертикальную стену тумана или облака, окутывающих горную вершину. Сам человек находится на некотором расстоянии на другой, соседней вершине в слабом тумане или небольшом облачке. Такие условия часто создаются в горах рано утром, когда солнечные лучи падают на горы в направлении, близком к горизонтальному. Увеличенная тень человека (ее размеры будут тем больше, чем дальше стена тумана или облака) оказывается окруженной радужными кольцами.

Неожиданное появление яркой гигантской глории производит сильное впечатление. Человек что-то делает, например поднимает руку с ледорубом, и его тень в центре глории повторяет все его движения. Это явление впервые было описано по наблюдениям на г. Брокен в горном массиве Гарц в Средней Германии и получило название брокенского призрака. Аналогичного вида глории многократно видели альпинисты в горах Кавказа и Памира и в других горных районах мира.

Нимбы

Глория возникает не только вокруг тени самолета или орбитальной станции, как это описано выше. Она может появиться и вокруг тени головы человека. Хотите увидеть сияние вокруг тени от вашей головы? Для этого надо летом рано утром, как только встанет Солнце, пойти на луг, обильно покрытый росой. Вы увидите, что голова вашей тени окружена глорией. Такие глории принято называть нимбами. В христианской и буддийской иконографии нимбами окружены головы святых. Как вы убедились, нимб может появиться вокруг тени любого человека, и в этом нет ничего необычного.

В Японии, например, известны „рисовые" нимбы, которые наблюдаются вокруг тени человека, идущего по рисовому полю. Иногда нимбы возникают и на сухих шероховатых поверхностях, чаще всего на песке („сухие" нимбы), хотя при наличии капелек росы, действующих как собирательные линзы, свечение в нимбе усиливается.

Глории, брокенские призраки, нимбы возникают аналогично венцам за счет дифракции солнечных лучей. Они образуются крайними касательными лучами, падающими на поверхность сферической частицы (капельки облака или тумана, росы, песчинки). При прохождении лучей внутрь частицы при некоторых углах основная масса лучей почти полностью отражается и направляется назад, почти параллельно падающим лучам. Эти-то лучи и создают дифракционную картину в обратном направлении. Поэтому глорию называют также „антивенец" или „антикорона".

Нимбы чаще всего возникают при низком Солнце, так как увидеть нимб можно только в том случае, если в ваш глаз попали лучи, рассеянные под углом 180°. Это относится и к условиям возникновения брокенского призрака. Глории наблюдаются при любых высотах Солнца.

В Швейцарии на горах Юнгфрау и Сентис проводились специальные наблюдения за светом глорий вокруг головы наблюдателя при наличии тумана. Оказалось, что свет глорий (в отличие, например, от высокополяризованного света радуг) характеризуется слабой степенью поляризации и другим положением плоскости поляризации.

Иризация облаков

Когда Солнце или Луна просвечивают сквозь тонкие слоисто-кучевые, высоко-кучевые или перисто-кучевые облака, эти облака на малых и больших площадях на угловых расстояниях от Солнца до 30° и иногда больше или только в отдельных местах (пятнами) светятся радужными цветами, с преобладанием красного и зеленого. Облака часто переливаются различными цветами, подобно перламутру. Особенно интенсивная иризация имеет место у краев облака.

Иризирующие пятна на облаках — это чаще всего части венцов, а на больших расстояниях от Солнца — кругов гало.

Иризация часто возникает в облачных слоях за самолетами. Из теории дифракции известно, что в начальной стадии возникновения конденсационных самолетных следов диаметр облачных капелек составляет 1—3 мкм. Как венец, так и иризация чаще всего наблюдаются в пределах угловых расстояний от Солнца не более 20°. Однако венец обычно имеет меньший

угловой радиус и создается относительно более крупными каплями, в то время как иризация наблюдается на несколько бóльших угловых расстояниях и создается теми частями облака, где имеется много мелких капель разнообразных размеров.

Иризирующие облака наблюдаются и из космоса. Так, при полете на орбитальной станции „Салют-6“ в 1978 г. космонавты видели радужные облака примерно в районе 55—60° ю. ш. Облака имели желтовато-коричневый цвет, за что их назвали „горчичными“. Высота облаков была порядка 40—50 км. Перед восходом Солнца на высоте 15—20 км космонавты наблюдали два раза фиолетовые облака.

Появление окрашенных облаков — также проявление иризации. Возникновение окраски в таких облаках сами космонавты объясняют следующим образом. При движении кристаллов в облаке всегда найдутся такие по ориентации ледяные пластинки, которые дадут отраженный свет в направлении наблюдателя. Интерференция лучей, отраженных от передней и задней поверхностей ледяных пластинок, и образует радужную окраску. Цвет облаков определяется толщиной пластинок. Одинаковый чистый цвет приобретает облако, имеющее ледяные пластинки одинаковой толщины.

Радужные и горчичные облака, наблюдавшиеся космонавтами, можно считать разновидностью перламутровых облаков, наблюдаемых с Земли.

Кольцо Бишопа

При сильных вулканических извержениях в атмосферу выбрасывается огромное количество вещества: пепла, вулканической пыли, газов, водяного пара. Вулканическая пыль достигает больших высот, 25—30 км, и воздушными течениями разносится по всему земному шару. После таких извержений, как извержения Кракатау в 1883 г. и Агунга в 1963 г. в Индонезии, Катмая в 1912 г. на Аляске, Мауна-Лоа в 1985 г. на Гавайских островах, вокруг Солнца появлялось коричнево-красное кольцо с внешним угловым радиусом около 22° и шириной 10°. Небо внутри кольца было светлым с голубоватым оттенком.

Это явление было названо кольцом Бишопа по имени первого его исследователя. Судя по размеру, кольцо можно было принять за круг гало радиусом 22°. Однако это был гигантский венец, а не гало. Об этом говорило расположение цветов в кольце Бишопа, наружный край которого был красным, как у венца. Необычайно большой размер венца объяснялся маленькими размерами частичек, кристаллизовавшихся в верхних слоях атмосферы из газообразных продуктов, выброшенных при вулканическом извержении. Если принять размер кольца равным 22° и вычислить по формуле (4.1) диаметр частичек, он получается равным 1,8 мкм; если вычислить его по формуле (4.2), считая, что газообразные продукты сконденсировались в виде удлиненных игл, их диаметр получается равным 1,5 мкм.

Если внимательно наблюдать за описанными оптическими явлениями — венцами, глориями, иризацией, измерять угловые размеры колец, обратить внимание, как они изменяются (если есть возможность измерить поляризацию света от них), то можно получить полезную информацию о микрофизических условиях в наблюдаемых облаках.

5. Радуги

Но что мной зримая вселенна?
И что перед тобою я?
Ничто! Но ты во мне сияешь
Величеством твоих доброт,
Во мне себя преображаешь,
Как Солнце в малой капле вод.

Г. Р. Державин

Сколько бывает радуг?

Вряд ли найдется человек, который не любовался бы радугой. Появившись на небосводе, она невольно приковывает внимание. А сколько легенд и сказаний связано с радугой у разных народов! В русских летописях радуга называется „райской дугой“ или сокращенно „райдугой“. В Древней Греции радугу олицетворяла богиня Ирида („Ирида“ и означает „радуга“). По представлениям древних греков, радуга соединяет небо и землю, и Ирида была посредницей между богами и людьми. В русский язык вошли и другие слова с тем же греческим корнем: ирис — радужная оболочка глаза, иризация, иридий.

Радуга всегда связывается с дождем. Она может появиться и перед дождем, и во время дождя, и после него, в зависимости от того, как перемещается облако, дающее ливневые осадки. Об этом говорят и народные поговорки: „Радуга-дуга! Перебей дождя!“, „Радуга-дуга! Принеси нам дождь!“

Первая попытка объяснить радугу как естественное явление природы была сделана в 1611 г. архиепископом Антонио Доминисом. Его объяснение радуги противоречило библейскому, поэтому он был отлучен от церкви и приговорен к смертной казни. Антонио Доминис умер в тюрьме, не дождавшись казни, но его тело и рукописи были сожжены.

Обычно наблюдаемая радуга — это цветная дуга угловым радиусом 42°, видимая на фоне завесы ливневого дождя или полос падения дождя, часто не достигающих поверхности Земли. Радуга видна в стороне небосвода, противоположной Солнцу, и обязательно при Солнце, не закрытом облаками. Такие условия чаще всего создаются при выпадении летних ливневых дождей, называемых в народе „грибными“ дождями. Центром радуги является точка, диаметрально противоположная Солнцу,— антисолярная точка. Внешняя дуга радуги красная, за нею идет оранжевая, желтая, зеленая дуги и т. д., кончая внутренней фиолетовой.

Сколько радуг можно увидеть одновременно?

Неискушенный наблюдатель видит обычно одну радугу, изредка две. Причем вторая радуга, концентрическая с первой, имеет угловой радиус около 50° и располагается над первой. Вторая радуга более широкая, блеклая, расположение цветов в ней обратное первой радуге: внешняя дуга у нее фиолетовая, а внутренняя красная.

Самое удивительное, что большинство людей, наблюдавших радугу много раз, не видят, а точнее не замечают дополнительных дуг в виде нежнейших цветных арок внутри первой и снаружи второй радуг (т. е. со

стороны фиолетовых краев радуг). Эти цветные дуги (их обычно три-четыре) неправильно названы дополнительными — в действительности они такие же основные (или главные), как первая и вторая радуги. Эти дуги не образуют целого полукруга или большой дуги и видны только в самых верхних частях радуг, т. е. вблизи „вершин", или „макушек", основных радуг, когда же последние переходят в вертикальное положение (или близкое к нему), дополнительные дуги пропадают. Именно в этих дугах, а не в основных, сосредоточено наибольшее богатство чистых цветовых тонов, которое и породило выражение „все цвета радуги".

Радуги можно увидеть около водопадов, фонтанов, на фоне завесы капель, разбрызгиваемых поливальной машиной или полевой поливальной установкой. Можно самому создать завесу капель из ручного пульверизатора и, встав спиною к Солнцу, увидеть радугу, созданную собственными руками. У фонтанов и водопадов случалось видеть, кроме описанных двух основных и трех-четырех дополнительных дуг к каждой основной, еще одну или две радуги вокруг Солнца.

Как возникает радуга?

Откуда берется удивительный красочный свет, исходящий от дуг радуги? Все радуги — это солнечный свет, разложенный на компоненты и перемещенный по небосводу таким образом, что он кажется исходящим от части небосвода, противоположной той, где находится Солнце.

Научное объяснение радуги впервые дал Рене Декарт в 1637 г. Декарт объяснил радугу на основании законов преломления и отражения солнечного света в каплях выпадающего дождя. В то время еще не была открыта дисперсия — разложение белого света в спектр при преломлении. Поэтому радуга Декарта была белой.

Спустя 30 лет Исаак Ньютон, открывший дисперсию белого света при преломлении, дополнил теорию Декарта, объяснив, как преломляются цветные лучи в каплях дождя. По образному выражению американского ученого А. Фразера, сделавшего ряд интересных исследований радуги уже в наше время, „Декарт повесил радугу в нужном месте на небосводе, а Ньютон расцветил ее всеми красками спектра".

Несмотря на то что теория радуги Декарта — Ньютона создана более 300 лет назад, она правильно объясняет основные особенности радуги: положение главных дуг, их угловые размеры, расположение цветов в радугах различных порядков.

Для объяснения радуги мы пока и ограничимся теорией Декарта — Ньютона, которая подкупает своей удивительной наглядностью и простотой.

Лучи радуги

Итак, пусть параллельный пучок солнечных лучей падает на каплю (рис. 5.1). Ввиду того что поверхность капли кривая, у разных лучей будут разные углы падения. Они изменяются от 0 до 90°. Проследим путь луча, упавшего в точку A, его угол падения обозначим i. Преломившись под углом преломления r, луч входит в каплю и доходит до точки B. Часть энергии луча, преломившись, выходит из капли, часть, испытав внутреннее отра-

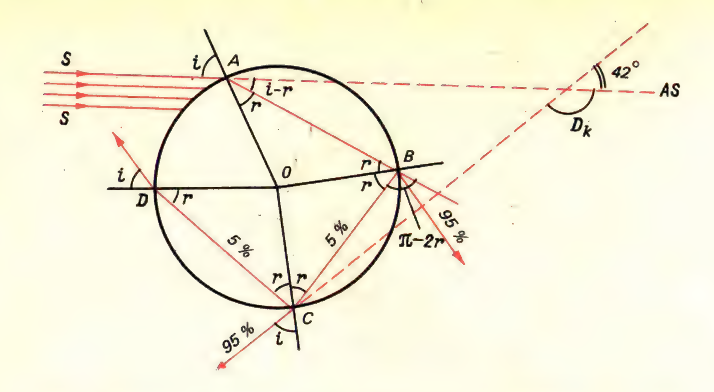


Рис. 5.1. Ход светового луча в капле при образовании первой и второй радуг.

жение в точке B, идет внутри капли до точки C. Здесь снова часть энергии луча, преломившись, выходит из капли, а некоторая часть, испытав второе внутреннее отражение, доходит до точки D и т. д. В принципе луч может испытывать любое число (k), внутренних отражений, а преломлений у каждого луча два — при входе и при выходе из капли.

Обозначим D_k угол отклонения любого луча после прохождения им капли. Тогда из рис. 5.1 очевидно, что

$$D_k = 2(i - r) + k(\pi - 2r), \tag{5.1}$$

здесь k — число внутренних отражений луча.

Параллельный пучок лучей, падающий на каплю, по выходе из капли оказывается сильно расходящимся (рис. 5.2). Концентрация лучей, а значит, и их интенсивность тем больше, чем ближе они лежат к лучу, испытавшему минимальное отклонение. Путь минимально отклоненного луча обозначен на рисунке пунктиром. Только минимально отклоненный луч и самые близкие к нему лучи обладают достаточной интенсивностью, чтобы образовать радугу. Поэтому этот луч и называют *лучом радуги*.

Минимальное отклонение луча, испытавшего одно внутреннее отражение ($k = 1$), по теории Декарта равно:

$$D_1 = \pi + 2(i - 2r). \tag{5.2}$$

Каждый белый луч, преломляясь в капле, разлагается в спектр, и из капли выходит пучок расходящихся цветных лучей. Поскольку у красных лучей показатель преломления меньше, чем у других цветных лучей, то они и будут испытывать минимальное отклонение по сравнению с остальными. Минимальные отклонения крайних цветных лучей видимого спектра красных и фиолетовых оказываются следующими: $D_{1к} = 137°30'$ и $D_{1ф} = 139°20'$. Остальные цветные лучи займут промежуточные между ними положения.

Солнечные лучи, прошедшие через каплю с одним внутренним отражением, оказываются исходящими от точек неба, расположенных ближе к антисолярной точке, чем к Солнцу. Поэтому, чтобы увидеть эти лучи, надо

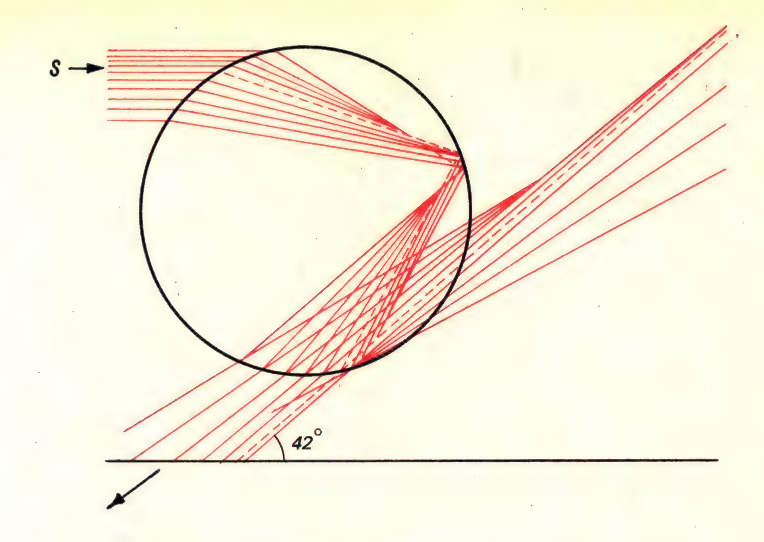


Рис. 5.2. Преломление пучка световых лучей в капле.

встать спиной к Солнцу. Расстояния их от антисолярной точки будут равны соответственно: 180° — 137°30′ = 42°30′ для красных и 180° — 139°20′ = = 40°40′ для фиолетовых.

Почему радуга круглая? Дело в том, что более или менее сферическая капля, освещенная параллельным пучком лучей солнечного света, может образовать радугу только в виде круга. Поясним это.

Описанный путь в капле с минимальным отклонением по выходе из нее проделывает не только тот луч, за которым мы следили, но также и многие другие лучи, упавшие на каплю под таким же углом. Все эти лучи и образуют радугу, поэтому их называют лучами радуги.

Сколько же лучей радуги в пучке света, падающего на каплю? Их много, по существу, они образуют целый цилиндр. Геометрическое место точек их падения на каплю это целая окружность.

В результате прохождения через каплю и преломления в ней цилиндр белых лучей преобразуется в серию цветных воронок, вставленных одна в другую, с центром в антисолярной точке, с открытыми раструбами, обращенными к наблюдателю. Наружная воронка красная, в нее вставлена оранжевая, желтая, далее идет зеленая и т. д., кончая внутренней фиолетовой.

Таким образом, каждая отдельная капля образует целую радугу! Радуга — „как Солнце в малой капле вод". Так образно и предельно лаконично выразил суть радуги Г. Р. Державин.

Конечно, радуга от одной капли слабая, и в природе ее невозможно увидеть отдельно, так как капель в завесе дождя много. В лаборатории же удавалось наблюдать не одну, а несколько радуг, образованных преломлением света в одной подвешенной капельке воды или масла при освещении ее лучом лазера. Подробнее об этом эксперименте рассказано ниже.

Радуга, которую мы видим на небосводе, мозаична — она образована мириадами капель. Каждая капля создает серию вложенных одна в другую цветных воронок (или конусов). Но от отдельной капли в радугу попадает только один цветной луч. Глаз наблюдателя является общей точкой, в которой пересекаются цветные лучи от множества капель. Например, все красные лучи, вышедшие из различных капель, но под одним и тем же углом и попавшие в глаз наблюдателю, образуют красную дугу радуги, также и все оранжевые и другие цветные лучи. Поэтому радуга круглая.

Два человека, стоящие рядом, видят каждый свою радугу. Если вы идете по дороге и смотрите на радугу, она перемещается вместе с вами, будучи в каждый момент образована преломлением солнечных лучей в новых и новых каплях. Далее, капли дождя падают. Место упавшей капли занимает другая и успевает послать свои цветные лучи в радугу, за ней следующая и т. д. Пока идет дождь, мы видим радугу.

Мы пояснили, как образуется первая радуга, наиболее часто наблюдаемая, с ярким внешним красным краем и внутренним фиолетовым.

Найдем ширину первой радуги Δ_1, т. е. угловое расстояние от ее красной дуги до фиолетовой с учетом поправки на угловую ширину Солнца, диаметр которого равен 32′: $\Delta_1 = 42°30' - 40°40' + 32' = 2°22'$.

Вторая радуга и следующие

Если повторить предыдущие рассуждения относительно лучей, испытавших в капле два внутренних отражения, получим следующие минимальные углы отклонения крайних цветных лучей. Для красных $D_{2k} = 230°54'$ и для фиолетовых $D_{2ф} = 233°56'$. Такие лучи так же, как и испытавшие одно отражение внутри капли, лежат ближе к антисолярной точке, чем к Солнцу. Угловые расстояния их от антисолярной точки будут равны: $230°54' - 180° = 50°34'$ для красных; $233°46' - 180° = 53°56'$ для фиолетовых. Эти лучи образуют радугу, концентрическую с первой, но с обратным расположением цветов. В этой радуге внутренняя дуга красная.

Угловая ширина второй радуги $\Delta_2 = 53°56' - 50°34' = 3°54'$.

Вторая радуга значительно шире первой и выглядит более слабой.

Расчеты для радуг следующих порядков ($k = 3, 4, 5, 6, 7, 8$ и т. д.) показали, что 3-я и 4-я радуги располагаются вокруг Солнца, 5-я и 6-я – вокруг антисолярной точки, 7-я и 8-я — снова вокруг Солнца и т. д.

В таблице приведены углы отклонения лучей красного цвета, угловые радиусы соответствующих радуг и положение их на небосводе согласно расчетам К. С. Шифрина по формулам дифракции.

k	D_k	Угловой радиус радуги	Положение на небосводе
1	137°29′	42°31	Вокруг антисолярной точки
2	129 54	50 06	
3	42 53	42 53	Вокруг Солнца
4	42 18	42 18	
5	126 31	53 29	Вокруг антисолярной точки
6	149 46	30 14	
7	66 22	66 22	Вокруг Солнца
8	16 51	16 51	

Возникает вопрос: почему мы не видим всех радуг? Это происходит потому, что из всей энергии луча, упавшего на каплю в точку A, примерно 7% отражается, 88 — проходит сквозь каплю и только 5% испытывает одно внутреннее отражение в точке B и идет дальше к точке C. Здесь снова происходит аналогичное разделение энергии между лучами, выходящими из капли и дважды отраженными от внутренней поверхности капли. Поэтому на радуги всех порядков расходуется менее 5% энергии падающего пучка, при этом „львиная“ доля — около 4% — идет на образование первой радуги. Обычно мы и можем видеть только первую радугу и изредка вторую. На остальные радуги остается слишком мало энергии, менее 1%, поэтому радуги высоких порядков не видны.

Почему радуга бывает разной?

По теории Декарта — Ньютона радуга должна быть всегда одинаковой — „застывшей“. Эти ученые правильно объяснили положение радуги на небосводе, размер дуг, расположение цветов в основных радугах любого порядка. В частности, по теории ширине дуг радуг всегда было „положено“ быть одной и той же. Однако радуга содержала еще много секретов. Внимательный наблюдатель видел иногда серию красочных дополнительных дуг, которым совсем „не было места“ в теории Декарта — Ньютона. Иногда радуга имела яркие насыщенные тона, а порой была совсем блеклой, почти белой. Радуга бывала и широкой и узкой — и все это „не укладывалось“ в теорию Декарта — Ньютона.

Объяснение всего комплекса радуги, со всеми неразгаданными ее особенностями, было сделано позже, когда была создана общая теория рассеяния (дифракции) световых лучей в атмосфере. В частности, стало ясно, что дополнительные дуги возникают вследствие интерференции лучей, лежавших по обе стороны от наименее отклоненного луча (луча радуги) и в непосредственной близости от него.

Размер и форма капель и их влияние на вид радуги

Расчеты по формулам дифракционной теории, выполненные для капель разного размера, показали, что весь вид радуги — ширина дуг, наличие, расположение и яркость отдельных цветовых тонов, положение дополнительных дуг очень сильно зависят от размера капель дождя. Приведем основные характеристики внешнего вида радуги для капель разных радиусов.

Радиус капель 0,5—1 мм. Наружный край основной радуги яркий, темно-красный, за ним идет светло-красный и далее чередуются все цвета радуги. Особенно яркими кажутся фиолетовый и зеленый. Дополнительных дуг много (до пяти), в них чередуются фиолетово-розовые тона с зелеными. Дополнительные дуги непосредственно примыкают к основным радугам.

Радиус капель 0,25 мм. Красный край радуги стал слабее. Остальные цвета видны по-прежнему. Несколько фиолетово-розовых дополнительных дуг сменяются зелеными.

Радиус капель 0,10—0,15 мм. Красного цвета в основной радуге больше нет. Наружный край радуги оранжевый. В остальном радуга хорошо разви-

та. Дополнительные дуги становятся все более желтыми. Между ними и между основной радугой и первой дополнительной появились просветы.

Радиус капель 0,04—0,05 мм. Радуга стала заметно шире и бледнее. Наружный край ее бледно-желтый. Самым ярким является фиолетовый цвет. Первая дополнительная дуга отделена от основной радуги довольно широким промежутком, цвет ее белесый, чуть зеленоватый и беловато-фиолетовый.

Радиус капель 0,03 мм. Основная радуга еще более широкая с очень слабо окрашенным чуть желтоватым краем, содержит отдельные белые полосы.

Радиус капель 0,025 мм и менее. Радуга стала совсем белой. Она примерно в два раза шире обычной радуги и имеет вид блестящей белой полосы. Внутри нее могут быть дополнительные окрашенные дуги, сначала бледно-голубые или зеленые, затем белесовато-красные.

Таким образом, по виду радуги можно приближенно оценить размеры капель дождя, образовавших эту радугу. В целом, чем крупнее капли дождя, тем радуга получается у́же и ярче, особенно характерным для крупных капель является наличие насыщенного красного цвета в основной радуге. Многочисленные дополнительные дуги также имеют яркие тона и непосредственно, без промежутков, примыкают к основным радугам. Чем капли мельче, тем радуга становится более широкой и блеклой с оранжевым или желтым краем. Дополнительные дуги дальше отстоят и друг от друга и от основных радуг.

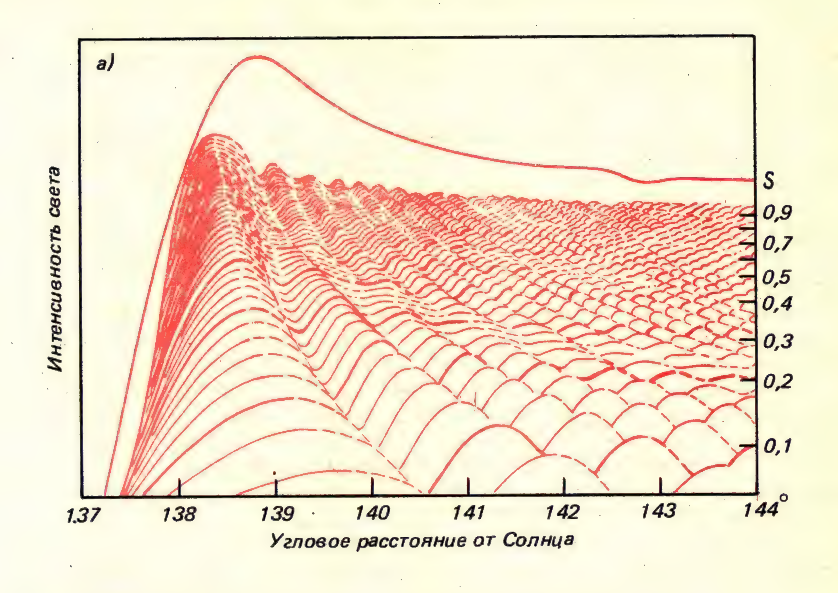
Вид радуги зависит и от формы капель. При падении в воздухе крупные капли сплющиваются, теряют свою сферичность. Вертикальное сечение таких капель приближается к элипсу. Расчеты показали, что минимальное отклонение красных лучей при прохождении через сплющенные капли радиусом 0,5 мм составляет 140°. Поэтому угловой размер красной дуги будет не 42°, а только 40°. Для более крупных капель, например радиусом 1,0 мм, минимальное отклонение красных лучей составит 149°, а красная дуга радуги будет иметь размер 31°, вместо 42°. Таким образом, чем сильнее сплющивание капель, тем меньше радиус образуемой ими радуги.

Разгадан „секрет" добавочных дуг!

А. Фразер, рассмотрев одновременно влияние размера и формы капель на вид радуги, сумел раскрыть „секрет" возникновения добавочных дуг. Как только что было сказано, уменьшение размера преобладающих капель и сплющивание крупных действуют в противоположных направлениях. Что же пересилит? Когда и какое влияние будет преобладающим?

Наглядной иллюстрацией взаимодействия обоих факторов и совместного их влияния на вид радуги являются рис. 5.3 *а* и *б*, составленные А. Фразером, на основании расчетов. На этих рисунках показано распределение интенсивности света в основной радуге и дополнительных дугах в зависимости от размера капель.

Сложная волнообразная поверхность на переднем плане (рис. 5.3 *а*) составлена из многих индивидуальных кривых. Каждая кривая дает распределение и интенсивность света в радуге от одной капли. Каждая пятая кривая проведена потолще, цифры справа означают радиус капли, соответ-



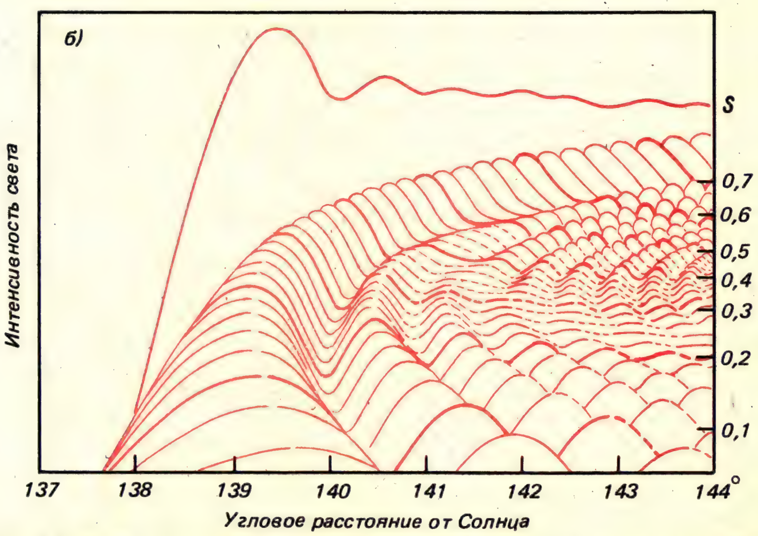


Рис. 5.3. Распределение интенсивности света в основной радуге и дополнительных дугах в зависимости от размера капель.

а — без учета сплющивания капель; *б* — с учетом сплющивания капель. *S* — суммарная кривая.

ствующей кривой, в миллиметрах. Все кривые начинаются слева с очень малой интенсивности (вне радуг), затем быстро поднимаются до максимума между 138 и 139° (первая радуга). Следующий гребень справа — первая дополнительная дуга, за ней вторая дополнительная дуга и т. д. Расстояние между дугами, как видно из рисунка, быстро уменьшается при увеличении радиуса капель. Это действие первого фактора. Радуга становится узкой при увеличении размера капель.

Верхняя кривая S — это результирующая сложения вкладов капель всех размеров. Она характеризует распределение интенсивности света в окончательной радуге, которую мы видим.

На рис. 5.3 *б* показаны те же кривые, но теперь учтено влияние сплющивания капель, тем более сильное, чем крупнее капли. Индивидуальные кривые для крупных сплющенных капель смещены в сторону больших минимальных углов отклонения от Солнца (или, что то же, в сторону уменьшения радиусов радуг), и в результате вся волнообразная поверхность оказалась изогнутой вправо (индивидуальные максимумы ушли вправо). Это привело к тому, что на результирующей суммарной кривой появились, помимо основной радуги, еще дополнительные дуги, на угловых расстояниях от Солнца: первая —140,5°, вторая —141,3°, третья — 142,4°, четвертая —142,5°.

Дополнительные дуги видны только вблизи вершины основной радуги, так как они образованы только вертикальными или близкими к ним лучами, прошедшими через эллиптические сечения капель.

Расчетами показано, но это можно проследить и по рис. 5.3 *б*, что дополнительные дуги создаются в основном каплями размером от 0,2 до 0,3 мм. Более крупные и более мелкие капли дают максимумы, накладывающиеся друг на друга и слишком далеко отстоящие от основной радуги (они уходят вправо). Радуги капель диаметром 0,2—0,3 мм находятся в преимущественном положении, поскольку их максимумы никуда не сместились. Таким образом, можно сделать вывод, что дополнительные дуги видны, если в ливневом дожде присутствуют в значительном количестве капли радиусом 0,25 мм и мало более крупных капель, смазывающих картину. Поэтому дополнительные дуги чаще видны и наиболее красочны не в очень интенсивных летних ливневых дождях. Они появляются также на фоне завесы из мельчайших капель, образующихся при разбрызгивании воды в поливальных установках.

Можно ли видеть целый круг радуги? С поверхности Земли мы можем наблюдать радугу в лучшем случае в виде половины круга, когда Солнце находится на горизонте. При поднятии Солнца радуга уходит под горизонт. Первую радугу можно видеть при высотах Солнца более 42°, а вторую — более 50°. С самолета, а еще лучше с вертолета (больше обзор) можно наблюдать радугу в виде целого круга! Описание такой круговой радуги (ее и радугой, т. е. дугой, уже неудобно называть!) было помещено в журнале „Природа". Ее видели пассажиры самолета, летевшего в районе Новосибирска на высоте 1000 м.

Поляризация света радуг. Свет радуги характеризуется необычайно высокой степенью поляризации. В первой радуге она достигает 90%, во второй — около 80%. В этом легко убедиться, если посмотреть на радугу через поляризационную призму Николя. При небольших углах поворота призмы радуга полностью пропадает.

Бóльшая степень поляризации света радуг, в отличие от гало, венцов, глорий, используется для решения спорных вопросов о том, что наблюдается, радуга или гало? Или это глория? К этому вопросу вернемся после рассмотрения гало.

Радуга без дождя?

Бывают ли радуги без дождя или без полос падения дождя? Оказывается, бывают — в лаборатории. Искусственные радуги создавались в результате преломления света в одной подвешенной капельке дистиллированной воды, воды с сиропом или прозрачного масла. Размеры капель варьировали от 1,5 до 4,5 мм. Тяжелые капли вытягивались под действием силы тяжести, и их сечение в вертикальной плоскости представляло собою эллипс. При освещении капельки лучом гелий-неонового лазера (с длиной волны 0,6328 мкм) появлялись не только первая и вторая радуги, но и необычайно яркие третья и четвертая, с центром вокруг источника света (в данном случае лазера). Иногда удавалось получать даже пятую и шестую радуги. Эти радуги, как первая и вторая, снова были в стороне, противоположной источнику.

Итак, одна капелька создала столько радуг! Правда, эти радуги не были радужными. Все они были одноцветными, красными, так как образованы не белым источником света, а монохроматическим красным лучом.

Туманная радуга

В природе встречаются белые радуги, о которых говорилось выше. Они появляются при освещении солнечными лучами слабого тумана, состоящего из капелек радиусом 0,025 мм или менее. Их называют туманными радугами. Кроме основной радуги в виде блестящей белой дуги с едва заметным желтоватым краем наблюдаются иногда окрашенные дополнительные дуги: очень слабая голубая или зеленая дуга, а затем белесовато-красная.

Аналогичного вида белую радугу можно увидеть, когда луч прожектора, расположенного сзади вас, освещает интенсивную дымку или слабый туман перед вами. Даже уличный фонарь может создать, хотя и очень слабую, белую радугу, видимую на темном фоне ночного неба.

Лунные радуги

Аналогично солнечным могут возникнуть и лунные радуги. Они более слабые и появляются при полной Луне. Лунные радуги явление более редкое, чем солнечные. Для их возникновения необходимо сочетание двух условий: полная Луна, не закрытая облаками, и выпадение ливневого дождя или полос его падения (не достигающих Земли). Ливневые дожди, обусловленные дневными конвективными движениями воздуха, значительно реже выпадают ночью.

Лунные радуги могут наблюдаться в любом месте земного шара, где осуществятся перечисленные два условия.

Дневные, солнечные радуги, даже образованные самими мелкими каплями дождя или тумана, довольно белесые, светлые, и все же наружный край их хотя бы слабо, но окрашен в оранжевый или желтый цвет. Радуги, образованные лунными лучами, совсем не оправдывают своего названия, так как они не радужные и выглядят как светлые, совершенно белые дуги.

Отсутствие красного цвета у лунных радуг даже при крупных каплях ливневого дождя объясняется низким уровнем освещения ночью, при котором полностью теряется чувствительность глаза к лучам красного цвета. Остальные цветные лучи радуги также теряют в значительной степени свой цветовой тон из-за ахроматичности (неокрашенности) ночного зрения человека (см. подробнее в главе 8 об эффекте Пуркинье).

6. Гало

> Чем больше вникают в деяния природы, тем видима наиболее становится простота законов, коим следует она в своих деяниях.
>
> *А. Н. Радищев*

Многообразие форм гало

Если Солнце или Луна просвечивает через тонкие перисто-слоистые облака, состоящие из ледяных кристаллов, на небе часто появляются световые явления, называемые гало. В русских летописях их называют галосами.

Явления гало отличаются большим многообразием. Наиболее часто наблюдается радужный круг вокруг Солнца угловым *радиусом 22°*, реже концентрический с ним круг угловым *радиусом 46°* и совсем редко *круг 90°* (гало Гевелия). Иногда виден *белый горизонтальный*, или *паргелический, круг,* проходящий через Солнце и параллельно плоскости горизонта. На пересечении этого круга с кругами гало 22 и 46° появляются яркие радужные пятна — *ложные* (или побочные) *солнца,* или *паргелии,* а также *ложные луны,* или *парселены.* Ложные солнца и луны могут быть и в других местах белого горизонтального круга, который потому и называется паргелическим кругом. Довольно часто возникают касательные дуги к кругам гало, чаще горизонтальные и реже боковые.

В моменты, близкие к заходу или восходу Солнца, как правило, когда оно находится на небольшой глубине под горизонтом, над Солнцем, а иногда и под ним появляются *световые столбы.* На паргелическом круге против Солнца или Луны возникает светлое пятно — *противосолнце (антелий)* или *противолуна (антиселена).* Светлое пятно в солнечном вертикале, диаметрально противоположное Солнцу, называют *нижним солнцем.* Нередко возникают *касательные дуги* к гало 22 и 46°, чаще горизонтальные и реже вертикальные. Бывают и другие косые дуги — около антелия, в окрестностях зенита. Некоторые формы гало имеют персональные назва-

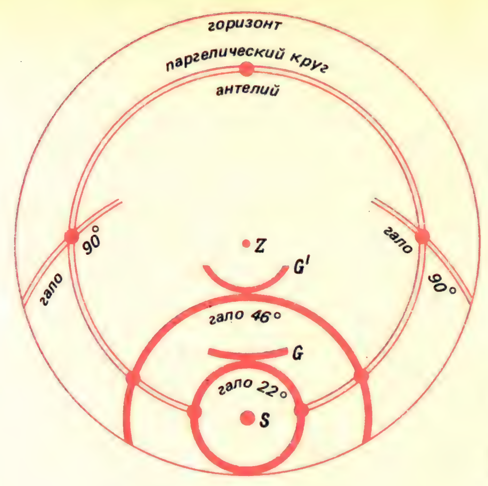


Рис. 6.1. Положение на небосводе различных явлений гало.

Закрашенные круги и дуги — цветные гало, незакрашенные — белые гало. S — Солнце, Z — зенит, G и G' — касательные дуги.

ния по имени авторов, их обнаруживших и описавших — гало Гевелия, гало Бугера, дуги Ловица, дуги Перри и др. Положение на небосводе большинства перечисленных форм гало показано на рис. 6.1.

Гало могут возникнуть и в облачных следах за самолетами.

Из различных форм гало наиболее часто появляется круг гало радиусом 22°. Например, в Ленинграде, Москве его можно видеть в среднем раз в три дня. В штате Висконсин (США) он наблюдается еще чаще — 160 дней в году, т. е. в среднем через день. Повторяемость гало обусловлена частотой появления перисто-слоистых облаков. Круг гало радиусом 46° более редкий, его можно видеть всего несколько раз в году.

Часто на небе наблюдается одновременно несколько форм гало. Сложный комплекс из разнообразных гало наблюдался в Петербурге 18 июля 1794 г. Он был тщательно зарисован и описан петербургским астрономом Т. Ловицем и вошел в литературу под названием Петербургского феномена. На небе одновременно наблюдалось 12 различных кругов и дуг, из них 9 цветных. Описаны и другие сложные гало, которые наблюдались в разных местах земного шара.

Появление на небе одновременно нескольких солнц, световых крестов, косых дуг, которые, особенно во время зари, казались „кровавыми мечами", в прежние времена вызывало у людей страх, рождало суеверия, воспринималось как предвестие большой беды — войны, голода. Приведем пример из истории нашей родины, когда появление редких световых явлений сказалось на настроении людей, их видевших. Я имею в виду поход князя Игоря против половцев в конце XII в. Как только князь Игорь с войском выступил 1 мая 1185 г., произошло солнечное затмение. „Тогда Игорь взглянул на светлое солнце и увидел, что оно тьмою воинов его прикрыло." Но гордые князья не повернули коней. Первое сражение с половцами было победным. А затем бились еще три дня. Превосходящие по численности половцы начали одолевать русских. И тут четыре солнца появились на небе.

4 Зак. 809

„Черные тучи с моря идут, хотят прикрыть четыре солнца... Быть грому великому..." Дух воинов упал, войско русское все полегло, а Игорь был взят в плен.

Ледяные кристаллы в облаках

Как же возникают гало? Все формы гало являются результатом преломления солнечных или лунных лучей в ледяных кристаллах облака либо их отражения от боковых граней или оснований кристаллов, имеющих форму шестигранных столбиков или пластинок. Строго говоря, на кристаллах происходит дифракция солнечных или лунных лучей.

Объясним возникновение гало на основании законов геометрической оптики. Тем более что подавляющее большинство наблюдаемых явлений весьма успешно объясняются законами преломления и отражения.

Ледяные кристаллы облаков относятся к так называемым гексагональным, так как их сечения, перпендикулярные главной оси кристалла, представляют собой шестиугольники. Правильные гексагональные кристаллы бывают двух крайних типов: с хорошо развитой главной осью (рис. 6.2 *а*) — это ледяные шестигранные столбики (по форме похожие на карандаши) или ледяные иглы, и с плохо развитой главной осью (рис. 6.2 *б*) — это шестигранные пластинки. Ко второму типу относятся все виды снежинок.

Кристаллы в облаке живут сложной жизнью. Они совершают самые разнообразные движения, то опускаются, то поднимаются, испытывая действие многих процессов, происходящих в различных частях облака. Кристаллы могут обтаивать, опускаясь в более теплые слои, или, наоброт, на их концах и углах может откладываться изморозь. Таким образом, в частности, шестигранные пластинки превращаются в снежинки. Кристаллы смерзаются, слипаются, у снежинок обламываются концы и т. д. В результате этих процессов кристаллы теряют правильную форму.

Хотите убедиться в этом? Посмотрите на снежинки, упавшие на рукав темного пальто или на любую темную поверхность. Найдете ли вы хоть одну снежинку, у которой все шесть лучей имеют одинаковую длину? Или две

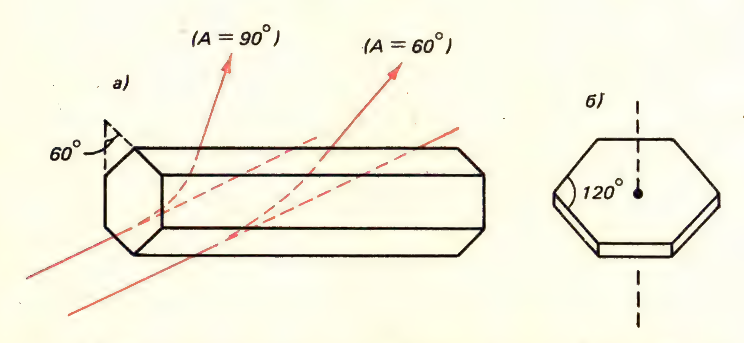


Рис. 6.2. Ледяные кристаллы: *а* — с хорошо развитой главной осью, *б* — с плохо развитой главной осью.

во всем одинаковые снежинки? Нет. Обязательно один или два, а то и три лучика обломаны. Все концы у снежинки оказываются разной длины.

В образовании гало разных форм большую роль играет ориентация кристаллов, т. е. положение их главных осей, при падении в атмосфере. Известно, что все тела, в том числе и кристаллы, при падении в воздухе испытывают аэродинамическое торможение и стремятся ориентироваться так, чтобы встретить максимальное сопротивление воздуха. В то же время броуновское движение и атмосферные флюктуации способствуют хаотической ориентации кристаллов. Эти факторы сильнее действуют на мелкие кристаллы или тонкие столбики, поэтому у них преобладает хаотическая ориентация. На большие столбчатые кристаллы и пластинки сильнее действует аэродинамическое торможение, и они падают ориентированно. Переход от хаотического к ориентированному положению определяется отношением толщины кристалла к его длине. Если это отношение приблизительно равно 1, такие кристаллы называют *кубикообразными*.

Таким образом, большие ледяные столбики и иглы падают так, что их главные оси принимают горизонтальное положение, т. е. боковой гранью вниз, достаточно большие пластинки или снежинки — так, что их главные оси принимают вертикальное положение, т. е. основаниями вниз, а разнообразные кристаллы неправильной формы падают при хаотическом положении главных осей.

Образование окрашенных гало

Рассмотрим, как происходит преломление солнечного или лунного света в ледяных кристаллах облаков.

Можно показать, что луч света, вошедший в ледяной кристалл (шестигранную призму), может выйти из него, если двугранный преломляющий угол меньше 99°32′. В кристаллах льда имеются два угла, удовлетворяющих этому условию: угол 60° — между боковыми гранями, взятыми через одну, и угол 90° — между боковой гранью и основанием.

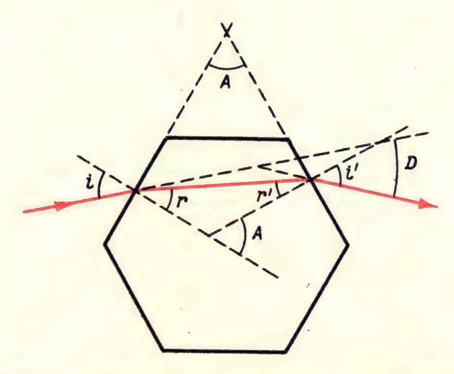


Рис. 6.3. Ход светового луча в ледяном кристалле.

Пусть солнечный луч падает на боковую грань кристалла (рис. 6.3) под углом падения i, угол его преломления r, угол выходящего из кристалла луча с другой гранью i' и соответствующий ему угол преломления r'. Угол отклонения луча от первоначального направления по выходе из кристалла

$$D = i - r + i' - r' = i + i' - A, \qquad (6.1)$$

где A — преломляющий угол призмы.

Гало, так же, как и радугу, образуют лучи, испытавшие минимальное отклонение в результате прохождения кристалла. Это имеет место при условии: $i = i'$ и $r = r'$. Таким образом,

$$D_{min} = 2i - A. \qquad (6.2)$$

Условие преломления для минимально отклоненного луча запишется:

$$\sin\left(\frac{D_{min} + A}{2}\right) = n \sin\frac{A}{2}, \qquad (6.3)$$

где n — показатель преломления льда.

Гало радиусом 22°. Рассмотрим несколько случаев прохождения лучей через кристаллы.

1) Главные оси кристаллов вертикальны. Солнце находится на горизонте. Его лучи входят в боковые грани и выходят также через боковые грани, взятые через одну (рис. 6.2 *а*). При таком пути луча шестигранный ледяной кристалл, по существу, работает как трехгранная призма с преломляющим углом 60°. При преломлении лучей происходит разложение белых лучей в спектр (дисперсия), и поэтому из кристалла выходит пучок цветных лучей, образующих пятна ложных солнц справа и слева от Солнца на угловых расстояниях: красные лучи ($n = 1{,}307$) $D_{min\,к} = 21°34'$, фиолетовые лучи ($n = 1{,}317$) $D_{min\,ф} = 22°22'$. Остальные цветовые лучи займут промежуточное положение между красными и фиолетовыми (рис. 6.4).

Лучи, упавшие на грани кристаллов под другими углами, испытывают большее отклонение и будут образовывать светлые хвосты ложных солнц, обращенных в сторону, противоположную Солнцу.

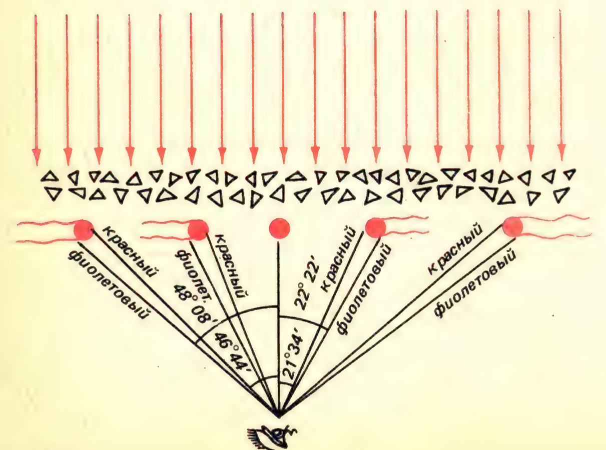


Рис. 6.4. К образованию ложных солнц и гало радиусом 22 и 46°.

2) Главные оси кристаллов горизонтальны. Солнце также на горизонте. Аналогично предыдущему случаю, появятся ложные солнца над и под Солнцем на таком же угловом расстоянии.

3) Ориентация главных осей кристаллов хаотическая. При такой ситуации возникнут ложные солнца во всевозможных направлениях, образуя целый круг гало угловым радиусом 22°. Так как хаотическая ориентация кристаллов является наиболее вероятной (для не очень крупных кристаллов и кристаллов неправильной формы), чаще всего и появляются круги гало и значительно реже — ложные солнца.

Гало радиусом 46°. Повторим предыдущие рассуждения для лучей, которые входят через боковую грань, а выходят через основания, или наоборот. При этом преломляющий угол кристалла равен 90°. В первых двух рассмотренных выше случаях возникнут ложные солнца над и под Солнцем и слева и справа от него соответственно (рис. 6.4). Минимальные отклонения крайних цветных лучей равны: $D_{\min к} = 45°44'$ и $D_{\min ф} = 48°08'$. При хаотической ориентации главных осей образуется круг гало вокруг Солнца (или Луны) с угловым радиусом около 46° и таким же расположением цветов, как и в круге гало 22°.

При увеличении высоты Солнца над горизонтом от 0 до 30° круг гало 22° растягивается до 28°, а хвосты ложных солнц немного укорачиваются. При более высоком положении Солнца гало практически не наблюдаются.

Касательные дуги. Из разнообразных касательных дуг чаще всего появляются горизонтальные касательные дуги (верхняя и нижняя) к гало радиусом 22°.

При всех изменениях кристаллов в облаке дольше всего сохраняется двугранный угол 60° у столбчатых форм кристаллов. Эти кристаллы падают при горизонтальном положении главных осей, и при преломлении в них, как уже говорилось, образуются ложные солнца над и под Солнцем. За счет вибрации главных осей кристаллов в горизонтальной плоскости ложные солнца размываются в верхнюю и нижнюю касательные дуги.

Боковые касательные дуги к гало 22° наблюдаются крайне редко. Это объясняется тем, что они могли бы быть образованы кристалликами, падающими при вертикальном положении главных осей, т. е. пластинками или снежинками, однако такие кристаллы содержат много пузырьков воздуха, полостей, лед в них неоднороден, и они редко могут дать правильное прохождение света.

Характер окраски у всех цветных гало одинаков. Часть гало, обращенная к Солнцу, окрашена в красный цвет, а противоположная — в синевато-сиреневый. У кругов гало красным является их внутренний край, у касательных дуг — часть дуги, а у ложных солнц — бок, обращенный к Солнцу.

Белые гало

Все белые (неокрашенные) гало возникают при отражении солнечных или лунных лучей от граней или оснований кристаллов. При отражении дисперсии белых лучей не происходит, и возникающие гало оказываются белыми. При образовании белых гало также важна ориентация отражающих частей кристаллов, играющих роль зеркала. Рассмотрим два случая.

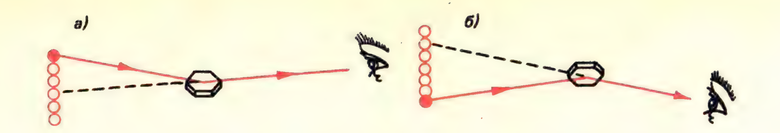


Рис. 6.5. К объяснению возникновения световых столбов: *а* — под Солнцем, *б* — над Солнцем.

1) Горизонтальная ориентация отражающих частей кристаллов. Такое положение при падении в воздухе принимают боковые грани ледяных столбиков и основания пластинок или снежинок. Если кристаллы совершают при этом еще небольшие колебания в вертикальной плоскости, то при отражении от них появятся *световые столбы* над и под Солнцем (рис. 6.5).

Видели ли вы световую лунную „дорожку" на воде, покрытой рябью? Возникновение столба совершенно аналогично отражению лунного диска в воде. Высота солнечных столбов может достигать 40°.

2) Вертикальная ориентация отражающих частей кристаллов. Такое положение при падении принимают основания ледяных столбиков и боковые грани пластинок. Угол падения лучей на отражающие части кристаллов может быть любым от 0 до 90°, и поэтому отраженные световые лучи идут во всевозможных направлениях и образуют *белый горизонтальный круг* (рис. 6.6).

Горизонтальный круг часто виден не целый, а кусками. В местах его пересечения с гало радиусом 22 или 46° образуются *кресты*. Крест, в центре которого находится Солнце, возникает при пересечении световых столбов с горизонтальным кругом.

Редкие формы гало

Гало отличается исключительным многообразием. Описаны случаи наблюдения кругов гало радиусом 8°, около 9°, 18, 19, 23, 34° и других радиусов, касательных дуг к этим кругам, различных касательных дуг, проходящих через антелий или расположенных в его окрестностях. Наибольшей яркостью отличается редко наблюдаемая околозенитная дуга. По чистоте цветов она превосходит радугу.

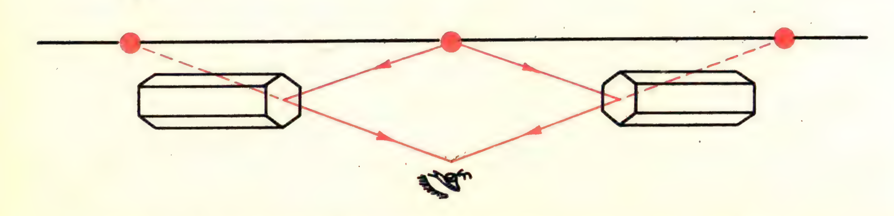


Рис. 6.6. К объяснению образования белого горизонтального круга.

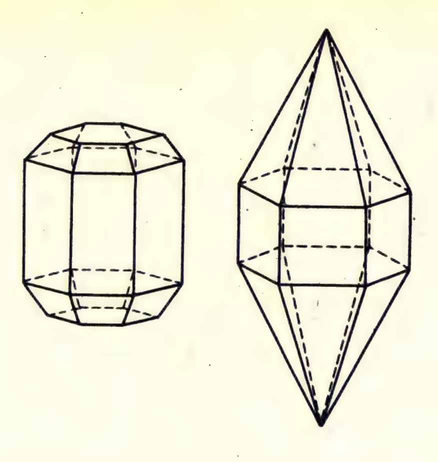


Рис. 6.7. Формы кристаллов, образующих редкие виды гало.

Необычные, редко наблюдающиеся формы гало могут быть образованы преломлением света в кристаллах нетипичных форм (рис. 6.7). В облаках встречались кристаллы в форме ледяных шестигранных столбиков с одной или двумя усеченными пирамидками на концах, в форме двух смерзшихся усеченных пирамидок, кубикообразные и другие.

Редкие формы гало возникают также за счет того, что в кристаллах помимо преломления (при входе и выходе луча из кристалла) происходят одно, два или несколько внутренних отражений (рис. 6.8).

Еще один довольно редкий вид гало — *гало Бугера*, о происхождении которого до сих пор идут споры. Гало Бугера — это белый круг вокруг антисолярной точки радиусом 35—38°. Его легко спутать с белой радугой, близкой к нему по угловому размеру и цвету. В отличие от радуги, имеющей хотя бы слабо окрашенный желтый или оранжевый край, гало Бугера совершенно не окрашено, не имеет дополнительных дуг и обычно наблюдается в комплексе с другими явлениями гало.

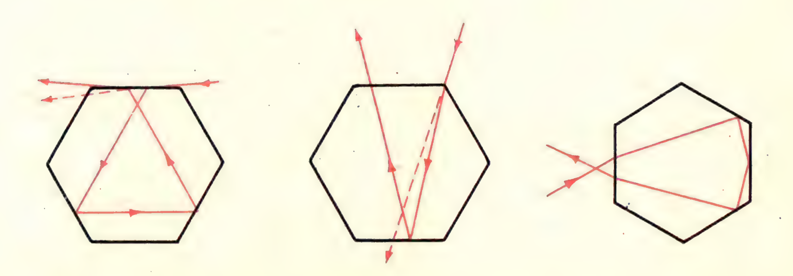


Рис. 6.8. К объяснению возникновения редких видов гало.

Гало в Антарктиде

Наиболее часто разнообразные гало возникают на внутриконтинентальных станциях, расположенных на ледяном куполе Антарктиды и на его склоне на высотах 2700—3500 м над уровнем моря. Это станции Восток (3488 м), Советская (3570 м), Амундсен-Скотт (2880 м), Пионерская (2700 м) и другие. Даже лето на такой высоте в глубине ледяного континента (более 500—1000 км от побережья) является самой настоящей суровой зимой. Средние температуры воздуха не поднимаются выше —25...—35° С. Постоянные сильные ветры и метели, особенно на антарктическом склоне, поднимают в воздух облака снежной пыли. Облака на этих станциях только кристаллические (ледяные), неплотные, их нижняя граница опускается до поверхности Земли.

В отсутствие плотных снежных облаков, когда светит Солнце, возникают необычайно яркие цветные и белые гало. Вокруг Солнца появляются иногда четыре ложных солнца (над и под ним и слева и справа), круги гало радиусом 22 и 46° и другие явления. Часто видны только нижние половинки кругов гало, и создается впечатление, что Солнце, по образному выражению Н. П. Русина, зимовавшего на станции Пионерская, „погружается в двойные или одинарные радужные чаши" (рис. 6.9).

Эту особенность гало на внутриконтинентальных станциях можно объяснить следующим образом. Поскольку станции расположены в высоких широтах, даже полуденная высота Солнца не превышает, например, на станциях Советская и Восток 33°, а на станции Амундсен-Скотт 23°. Поэтому нижний край круга гало, даже гало 22°, либо касается горизонта, либо расположен ниже его. Толщина ледяных облаков здесь совсем не-

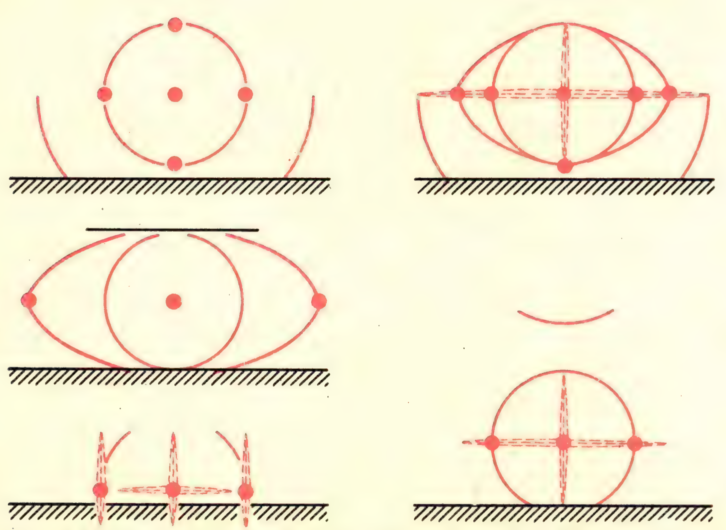


Рис. 6.9. Схемы явлений гало, наблюдавшихся в Антарктиде (по Н. П. Русину).

большая. Лучи Солнца, образующие нижнюю часть гало, проходят в косом направлении через бо́льшую толщу облаков по сравнению с лучами, образующими верхнюю часть кругов гало, и часто случается, что толщина облака оказывается недостаточной для образования видимых, достаточно ярких верхних частей гало.

Наблюдались и более редкие формы гало в виде эллиптических гало, описанных вокруг кругов радиусом 22 и 46°. Часто появлялись световые столбы и части паргелического круга. Их пересечение создавало впечатление, что Солнце находится внутри светового креста (рис. 6.9).

Очень редкий и сложный комплекс гало был сфотографирован А. Хоганом камерой всего неба на станции Амундсен-Скотт 28 января 1977 г. На приведенной схеме (рис. 6.10) видны одновременно два круга гало 22 и 46°, верхняя касательная дуга, околозенитная дуга, дуги Перри и другие дуги.

В дневниках антарктических экспедиций, в литературе об Антарктике упоминаются яркие „совершенно необычные радуги, выгнутые в обратную сторону“ (концами вверх). Очевидно, что это не радуги, а нижние части больших кругов гало (46 или 90°) — об этом говорит их форма: обратная кривизна и концы, повисшие в воздухе. У радуг этого не может быть. Да и при температурах —20 или —30° С ливневые дожди или полосы падения, необходимые для образования радуг, маловероятны. Яркие цвета гало обусловлены правильными формами кристаллов, дающих хорошее преломление и дисперсию света. Этому способствует и малая толщина ледяных облаков.

Гало в Антарктиде наблюдается часто в течение целого дня, изменяется лишь их форма и яркость цветов.

Другое интересное световое явление, которое видели только в глубине антарктического континента,— *радужный,* или *цветной, поземок.* Он наблюдается только при низком положении Солнца, и чтобы лучше его рассмотреть, надо лечь на снег и смотреть в сторону Солнца. Быстро пере-

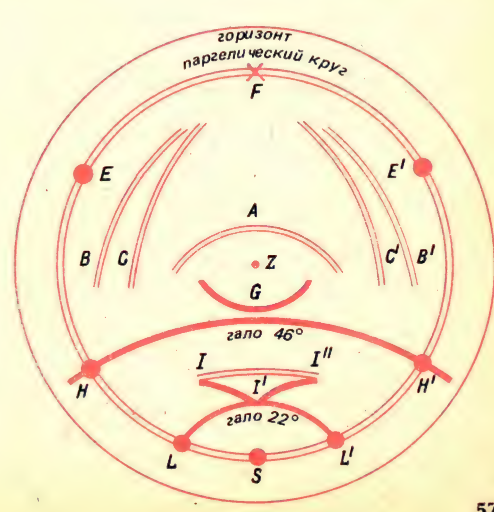


Рис. 6.10. Схема сложного комплекса гало, наблюдавшегося на станции Амундсен-Скотт 28 января 1977 г. А. Хоганом.
Z — зенит, S — Солнце, L, L' — паргелии 22°, H, H' — паргелии 120°, I, I', I'' — дуги Перри, G — околозенитная дуга, F — косые дуги, проходящие через антелий, A, B, B', C, C' — внутренние дуги.

мещаемые ветром струйки поземка, встречая на своем пути заструги снега, взлетают вверх, образуя малые и большие разноцветные фонтанчики, вспыхивающие всеми цветами радуги. „С возникновением цветного поземка в предполуночные часы Антарктида одевается необыкновенно красочным полупрозрачным покрывалом, образующим редкое по красоте и очень величественное зрелище," — пишет в книге „Метеорологический и радиационный режим Антарктиды" Н. П. Русин.

Цветной поземок возникает в результате преломления солнечного света в полных ледяных кристаллах, из которых состоит поземок, и в кристаллах, оседающих из облаков. Происхождение цветного поземка аналогично „игре" света в хрустальных люстрах, подвесках, бриллиантовых женских украшениях.

Во время полярной ночи в Антарктиде наблюдаются гало вокруг Луны. Они не столь разнообразны, как солнечные гало. Особенностью лунных гало является отсутствие в них красного цвета. Лунные круги гало всегда белые, светлые, с широким черным внутренним кольцом, что обусловлено эффектом Пуркинье, о котором речь пойдет ниже (см. главу 8).

Моделирование гало

Новые возможности в исследовании гало открылись в последние годы в связи с успешным применением моделирования. Приведем пример моделирования, выполненного Ф. Пэтлохом и Е. Трэнклем в 1984 г.

В проделанном с помощью ЭВМ численном эксперименте авторы проследили всевозможные пути 100 000 лучей в гексагональных кристаллах при разных высотах Солнца, используя только формулы преломления и отражения лучей, без привлечения дифракции. При этом часть лучей испытывала только внешнее отражение от различно ориентированных частей кристаллов, остальные — два обычных преломления и одно, два и более внутренних отражений в кристаллах. В результате эксперимента получено распределение света, объясняющее возникновение всевозможных ложных солнц, дуг, кругов, как часто наблюдаемых, так и редких, уточнены механизмы возникновения антелиев, антелических дуг (косых дуг, пересекающих антелий), световых столбов над и под антелием и других явлений. В частности, показано, что все антелические дуги возникают при двух и более внутренних отражениях солнечных лучей в укороченных ледяных столбиках, падающих при горизонтальном или близком к нему положении главных осей (см. рис. 6.8). Предсказаны новые, еще не известные формы гало, их положение на небосводе и высоты Солнца, при которых они могут появиться. Интересно отметить, что авторы смоделировали весь сложный комплекс гало, сфотографированный А. Хоганом (рис. 6.10).

Еще раньше, в 1980 г. Р. Г. Гринлер с сотрудниками воспроизвели моделированием знаменитый Петербургский феномен 1894 г., а также и другие сложные гало, сфотографированные современными аппаратами.

С помощью моделирования удалось исследовать роль многократного рассеяния в возникновении гало. Установлено, что некоторые формы гало возникают именно за счет многократного рассеяния. Так, при наличии кристаллов в виде толстых ледяных пластинок яркие паргелии 22° могут создать свои ложные солнца на расстоянии 44° и, возможно, 66° от Солнца,

а также бриллиантоподобную текстуру (иногда в виде маленьких крестиков) в околосолнечной области. За счет многократного рассеяния в длинных тонких ледяных столбиках возникают косые дуги около нижнего солнца и другие явления гало.

Нерешенные проблемы

Несмотря на большие успехи, достигнутые с помощью моделирования, все же еще есть разногласия между моделированными формами гало и рисунками или фотографиями. Не все наблюдавшиеся формы удалось смоделировать. До сих пор нет убедительного объяснения ряда особенностей даже часто наблюдаемых форм гало. Например, почему световые столбы узкие и имеют четкие края?

В последнее время ставится под сомнение одно из основных положений классической (геометрической) оптики гало, а именно, приведенное выше объяснение о том, что круги гало радиусом 22 и 46° возникают при хаотической ориентации главных осей кристаллов. Дело в том, что хаотическая ориентация типична для кристаллов размерами менее 7—10 мкм. Кристаллы таких размеров слишком малы, чтобы создать четкую дифракционную картину, т. е. не могут дать ярких гало.

Диаметры кристаллов в облаке, типичные для гало, лежат в пределах 12—50 мкм, а это уже переходная область от хаотической к строго упорядоченной ориентации. Если же кристаллы не имеют хаотической ориентации, то не могут возникнуть целые круги гало, будут только куски гало или дуги, как это часто наблюдается у круга гало 46°. Пластинчатые формы кристаллов, являясь в высшей степени ориентированными, также не могут создать круговое гало.

Какие кристаллы за что „отвечают“?

Наиболее часто наблюдаемый круг гало радиусом 22° и более редкий радиусом 46°, по-видимому, создаются хаотически ориентированными тонкими ледяными иглами. Более крупные кристаллы создают следующие формы гало: столбики — касательные дуги и световые столбы; пластинки — ложные солнца, нижние солнца, околозенитную дугу и горизонтальный круг.

Сравнительно редкое появление круга гало 46°, по сравнению с кругом гало 22°, объясняется тем, что это гало возникает при преломлении света в сплошных ледяных столбиках и в ограниченном диапазоне высот Солнца, в то время как гало 22° может возникать как в сплошных ледяных столбиках, так и в пластинчатых формах и в столбиках, включающих воздушные пузырьки.

При всех сложных процессах, которым подвергаются кристаллы в облаках, у них наиболее долго сохраняется двугранный угол 60°, обеспечивающий возникновение всех форм гало на угловом расстоянии 22° от Солнца — круга, касательных дуг и ложных солнц.

Поляризация света гало

Поляризация света, исходящего от гало, возникает за счет двух процессов: обычного (френелевского) преломления и двойного лучепреломления в кристаллах. Последнее оказывается определяющим поляризационные характеристики.

По существу, каждая компонента двойного лучепреломления дает свое гало, они смещены друг относительно друга на 0,11°. На внутреннем красном крае видна только одна компонента, и степень ее поляризации полная (100%), а далее в сторону от Солнца поляризация уменьшается из-за наложения второй поляризационной компоненты. На расстоянии 0,5° появляется второй максимум поля поляризации с характером поляризации, обратным первому. Полный максимум поляризации можно видеть только в монохроматическом красном свете, другие цветные максимумы из-за их наложения друг на друга не прослеживаются.

Высокая степень поляризации наблюдается у внутренних краев паргелиев, у касательных дуг, у околозенитной дуги. Это дает способ обнаруживать паргелии по поляризационному максимуму.

Средняя степень поляризации в белом свете у гало 22° около 4%, а у гало 46° около 16%. Этот максимум поляризации можно увидеть визуально, если смотреть через поляризационный фильтр или призму Николя.

Поляризационные исследования гало открывают новые перспективы изучения состава атмосфер других планет.

Гало на других планетах Солнечной системы

Первая попытка обнаружить присутствие льда в атмосфере Венеры по наблюдениям с Земли за гало вокруг планеты была сделана в Китт-Пикккской обсерватории (США) еще в 1966 г. По результатам фотометрических и поляризационных измерений, выполненных в трех длинах волн, были обнаружены слабые максимумы под углами рассеяния 153 и 165°. Однако их интенсивность была настолько мала, что определенных выводов сделать было нельзя. Попытки обнаружения поляризационных максимумов гало в свете Венеры повторились в 1971 г. и позднее.

В атмосферах планет Солнечной системы или их спутников явления, аналогичные гало, могут быть вызваны преломлением солнечных лучей не в ледяных, а в других кристаллах, например в кубикообразных кристаллах с низкими температурами плавления. Таковы кристаллы N_2, CO, CO_2, SO_2, CH_4. Конечно, у этих кристаллов для различных цветных лучей свои показатели преломления, отличающиеся от показателей преломления льда. Рассмотрим, как влияет изменение показателя преломления на вид гало. Рассчитаем в качестве примера радиус круга гало, образованного преломлением солнечных лучей в кристаллах, у которых такой же, как у льда, преломляющий угол 60°, а показатели преломления отличаются от льда: а) показатель преломления в 1,15 раза больше, б) в 1,15 раза меньше, чем у льда. Для красных лучей в случае а) $n_к = 1{,}503$. По формуле (6.3) получаем, что радиус круга гало будет равен 37°12′. В случае б) $n_к = 1{,}224$ и радиус круга гало получается равным 15°24′ вместо 21°34′ для гало в ледяных облаках. Если в кристаллах из других веществ будут отличаться и углы

преломления, то естественно, что это также будет влиять на изменение угловых размеров и форм гало.

При рассмотрении возможных путей прохождения солнечных лучей через перечисленные кристаллы (для каждого из которых характерен свой показатель преломления) при различных высотах Солнца и разных температурах было выявлено 30 различных возможных форм гало.

Наблюдения за Венерой принесли уже первые результаты. В верхней части ее атмосферы удалось обнаружить круг гало радиусом 28°, который мог быть образован преломлением в кубикообразных кристаллах льда.

В атмосфере спутника Юпитера Ио тоже наблюдалось гало, которое могли образовать солнечные лучи, преломившиеся в кристаллах SO_2. Считают, что кристаллы SO_2 попадают в атмосферу Ио при вулканических извержениях, которые зафиксированы на этом спутнике Юпитера.

Наблюдения за формами гало (повторим еще раз, наиболее перспективными являются поляризационные наблюдения) с космических кораблей, орбитальных станций, а также станций, спускаемых на поверхность планет или их спутников, могут дать полезную информацию о составе атмосфер этих планет.

Гало, венцы и погода

Наблюдение гало может служить местным признаком погоды. Гало всегда наблюдается в перисто-слоистых облаках, которые обычно входят в систему облаков теплого фронта. Поэтому появление гало говорит о приближении теплого фронта.

Какие же изменения погоды следует ожидать в связи с прохождением теплого фронта? Прежде всего — снижение и уплотнение облаков и выпадение осадков обложного характера: дождя, снега или мокрого снега, в зависимости от времени года.

Летом, при установившейся солнечной погоде, прохождение теплого фронта, сопровождающееся низкой облачностью и дождями, обычно воспринимается как ухудшение погоды.

Зимой, при установившейся морозной погоде, появление гало предвещает снижение морозов, потепление в связи со снижением и уплотнением облаков и переход к осадкам.

Ввиду того, что венцы образуются на более мелких элементах облака (каплях или кристаллах), чем гало, можно сделать следующие заключения. Если сначала наблюдались венцы, затем они пропали и через некоторое время появилось гало, то это говорит об укрупнении кристаллов облака и об увеличении вероятности выпадения осадков. Наоборот, если после гало появились венцы, значит, элементы облака испаряются, уменьшаются в размерах. Следовательно, уменьшается вероятность выпадения осадков.

Гало вокруг искусственных источников света

При появлении дымки или тумана, состоящих из ледяных игл, вокруг уличных фонарей могут возникнуть явления гало. Приведем описание таких явлений, наблюдавшихся вечером 12 декабря 1981 г. в Роттердаме. Темпе-

ратура воздуха в этот вечер понизилась до —10° С, появилась дымка, наблюдалось выпадение мелких ледяных игл. Вокруг Луны появился обычный круг гало радиусом 22° с хорошо развитой верхней касательной дугой к нему и световой столб. Вокруг уличных фонарей наблюдались необычного вида гало. Самыми яркими были световые столбы, проходившие через все фонари и достигавшие большой высоты. Другой особенностью было появление гало в виде эллипсов, описанных вокруг обычных кругов гало, и касательных дуг к ним. Форма этих гало изменялась в зависимости от высоты источника над поверхностью Земли. Гало вокруг фонарей не имели четко очерченного внутреннего края, и небо внутри кругов не было темным. Отличия гало вокруг искусственных источников света от лунных или солнечных объясняются следующим образом: солнечные и лунные гало образованы преломлением в кристаллах параллельных лучей, а гало вокруг фонарей — расходящихся лучей, ввиду близости источника света к наблюдателю. Гало, подобные описанным, неоднократно наблюдались вокруг маяков.

Немного об общей теории венцов, радуг, гало

К настоящему времени многочисленными работами советских и зарубежных ученых создана общая теория рассеяния электромагнитных волн в атмосфере, включающая в себя и теорию венцов, радуг, гало.

Ряд новых теоретических работ по исследованию венцов, глорий, радуг и гало в последнее десятилетие был выполнен зарубежными учеными, имена которых были названы при описании соответствующих явлений.

Согласно теории рассеяния, все рассмотренные явления возникают при дифракции и интерференции солнечных или лунных лучей на каплях и кристаллах облака, тумана или выпадающих осадков. Какое из явлений будет наблюдаться, определяется преобладающим размером элементов облака или осадков. Нельзя назвать четких границ размеров капель и кристаллов, при которых происходит смена одного явления другим. Переход осуществляется постепенно, а главное, что в облаках всегда присутствуют капли и кристаллы всевозможных размеров, как говорят оптики, спектр размеров капель. Для возникновения того или иного явления важно, чтобы в облаке или тумане преобладали капли или кристаллы определенного размера.

Пока элементы облака мелкие, не превышают примерно 6 мкм, наблюдаются типичные дифракционные максимумы в виде венцов (вокруг источников света). Был обнаружен и довольно четкий максимум яркости рассеянного света под углом 180°, соответствующий глории. Этот максимум был виден только в очень тонких облаках.

При укрупнении капелек облака до размеров 10 мкм и больше появляются дифракционные максимумы под углами рассеяния, типичными для положения радуг на небосводе. На индикатрисе рис. 2.2 *е*, полученной О. Д. Бартеневой, виден максимум, соответствующий первой радуге (под углом рассеяния 138°), на индикатрисе рис. 2.2 *ж* — несколько дифракционных максимумов. „Пики“ радуг отчетливо выражены только при малой оптической толщине облака (менее 1). Дальнейшее укрупнение капель в облаке, возможное лишь при значительном увеличении его оптической толщины, неизбежно приводит к исчезновению радуг.

Появление привычных нам радуг в завесе выпадающего дождя или около фонтанов, водопадов вызвано значительно более крупными каплями, хотя образованная ими завеса выпадающего дождя достаточно тонкая и радуги хорошо видны на фоне более темного неба.

Теоретические исследования дифракционных явлений в кристаллических облаках проводить труднее, и этих работ меньше. Тем не менее было показано, что при малых (также не превышающих 1) оптических толщинах кристаллического облака, состоящего из бесконечно длинных гексагональных цилиндров, появляются слабые максимумы гало начиная с размеров кристаллов 10 мкм, а более отчетливые — при 20 мкм и больше. Это исследование было распространено и на ледяные столбики конечной длины.

Итак, яркие венцы, глории, радуги, гало наблюдаются только в тонких облаках или завесах из капель дождя или из ледяных кристаллов, оптическая толщина которых не превышает 1.

Чем же это вызвано? Дело в том, что только в тонких облаках определяющим является рассеяние первого порядка, оно-то и создает все эти дифракционные максимумы („пики“), а роль многократного рассеяния еще мала, и оно не смазывает картины, созданной однократным рассеянием.

При достаточном увеличении размеров капель и кристаллов происходит постепенный переход от рассеяния (дифракции) к преломлению и отражению света в каплях и кристаллах. Законы теории рассеяния переходят в формулы геометрической оптики.

7. Рассеяние на службе у человека

> ...ум заключается не только в знании, но и в умении прилагать знание на деле...
>
> *Аристотель*

Об оптических методах исследования

Все оптические методы, о которых будет рассказано ниже, основаны на измерении характеристик рассеянного света. В промышленности широкое применение нашел малоугловой метод, в основе которого лежит измерение углового распределения яркости рассеянного света в области малых углов, т. е. близких к углу падения луча на исследуемую среду.

В актинометрии применяют ореольные фотометры для измерения яркости околосолнечного ореола.

Широкое распространение получили дистанционные оптические методы зондирования атмосферы. В основе этих методов исследования самой атмосферы, а также ближнего и дальнего космоса лежит измерение спектрального состава, углового распределения яркости и поляризации рассеянного в атмосфере, на ее различных уровнях, в разное время суток, солнечного света или света искусственных источников (лазеров, прожекторов).

Измерения могут проводиться как с поверхности Земли, так и с воздуха — на ракетах, космических кораблях, орбитальных станциях, искусственных спутниках Земли. Из наземных методов расскажем о лидарном, прожекторном и сумеречном.

Основной задачей перечисленных методов дистанционного зондирования атмосферы является исследование атмосферного аэрозоля: определение его концентрации на различных высотах, распределения частиц аэрозоля по размерам (спектра размеров), его физических и оптических свойств. Большим достоинством применяемых оптических методов является возможность исследовать мелкодисперсную, или субмикронную, часть атмосферного аэрозоля — частицы размером менее 1 мкм. Аэрозоли, состоящие из частиц такого размера, трудно исследовать прямыми методами, не нарушая при этом их структуры. Однако аэрозоли этой группы очень активно рассеивают свет, чем и „обнаруживают" свое присутствие в атмосфере. Благодаря рассеянному ими свету их и удается исследовать.

Ореольные фотометры

Мы уже видели, что индикатрисы рассеяния на крупных частицах сильно вытянуты вперед в направлении падения света и, согласно теории Ми, заканчиваются характерным дифракционным „носом", ответственным за появление околосолнечного ореола. Яркость ореола зависит от количества и размеров крупных частиц, содержащихся в атмосфере. Чем больше замутнена атмосфера, тем ярче околосолнечный ореол. Таким образом, яркость ореола является характеристикой степени замутнения атмосферы. На этом принципе и работают ореольные фотометры. Они измеряют яркость рассеянного солнечного света, поступающего от неба из области околосолнечного ореола (от околосолнечного кольца), при этом диск Солнца закрывается специальным экраном. Фотометр может быть проградуирован таким образом, что отсчеты по нему будут давать значение любой характеристики мутности или, наоборот, прозрачности атмосферы.

Малоугловой метод

Форма индикатрисы рассеяния очень чувствительна к малейшему изменению размера рассеивающих частиц, особенно в области малых углов, близких к 0°, т. е. в направлениях, близких к направлению падения света.

Широко применяется метод светорассеяния под малыми углами, разработанный К. С. Шифриным. Сущность метода заключается в следующем. Параллельный монохроматический пучок света от источника (это может быть лампа накаливания, ртутная лампа или луч лазера) направляется в рабочую камеру, где рассеивается в исследуемой аэрозольной среде. Рассеянный свет фокусируется и регистрируется приемным устройством. Это может быть фотопластинка или фотоэлектронный умножитель (ФЭУ). Далее измеряется яркость света, рассеянного под разными углами, и строится индикатриса рассеяния. На фотопластинке измеряется степень ее почернения в точках, соответствующих разным углам рассеяния, а ФЭУ поворачивается и измеряет яркость рассеянного света под разными углами

рассеяния. Индикатриса рассеяния (ее форма) содержит в себе информацию о дисперсном составе рассеивающих частиц. Чтобы получить эту информацию, надо решить обратную задачу теории рассеяния: по измеренной индикатрисе получить распределение крупных частиц по размерам. Это и выполняется методом К. С. Шифрина.

Метод нашел широкое применение в промышленности. Он используется для контроля за работой газовых и паровых турбин, определения спектра размеров капель в водяном факеле пневмометрических форсунок, определения дисперсного состава капель в потоке природного газа и промышленной пыли, поступающей в пылеулавливающие устройства ряда производств. Метод светорассеяния под малыми углами является обобщением метода венцов, изложенного в главе 4. Только в методе венцов определяется средний размер частиц облака или тумана, а в методе малых углов восстанавливается вся кривая распределения частиц аэрозоля по размерам.

Лидарное зондирование

Зондирование атмосферы с помощью лазерных локаторов (лидаров*) в последние годы необычайно быстро развивалось. В Советском Союзе большие успехи в разработке, совершенствовании и широком применении лидарного метода достигнуты в работах В. Е. Зуева, В. М. Захарова и их сотрудников.

Сущность лидарного метода состоит в следующем: вертикально в атмосферу посылается лазерный импульс определенной длины волны, интенсивности и длительности. Приемным устройством регистрируются возвращающиеся эхосигналы, рассеянные различными объемами воздуха, расположенными вдоль распространения луча лазера. Интенсивность принимаемых эхосигналов определяется, помимо технических характеристик лидарной установки (мощности и длительности импульса, эффективности приемной системы и т. д.), объемным коэффициентом так называемого обратного рассеяния. Иными словами, интенсивностью света, рассеянного под углом 180° (т. е. назад) каждым объемом воздуха, от которого приходит эхосигнал. Путем обработки результатов зондирования получают сведения об изменении с высотой (высотном ходе) сначала общего объемного коэффициента обратного рассеяния, а затем объемного коэффициента обратного аэрозольного рассеяния. Далее решается обратная задача — по высотному ходу объемного коэффициента обратного аэрозольного рассеяния восстанавливается высотный ход коэффициента рассеяния.

Лидарные методы имеют ряд преимуществ перед другими наземными — прожекторным и сумеречным. Лучи лазеров практически монохроматичны. У них высокое пространственное разрешение. Например, при длительности лазерного импульса 10 нс лидар обеспечивает определение расстояния и пространственное разрешение порядка 10 м. Расходимость луча лазера, в отличие от луча прожектора, необычайно мала — всего несколько дуговых минут. При расходимости луча, например, в минуту на расстоянии 100 км диаметр луча равен примерно 30 м. Поэтому при длительности им-

---

* Слово „лидар“ составлено из первых букв английского названия установки light detection and ranging.

5 Зак. 809

пульса 10 нс импульс доставляет рассеянный свет из цилиндра длиною и диаметром всего 30 м!

Лидарное зондирование можно применять до высот порядка 100 км. С его помощью получена богатая информация о повторяемости аэрозольных слоев на разных высотах. На высотах до 30 км чаще всего наблюдается несколько аэрозольных слоев. Наибольшая повторяемость аэрозольных слоев приходится на высоты около 22 км и 80 км. Много новых интересных сведений было получено этим методом о серебристых облаках, располагающихся на высотах около 80 км (подробнее см. главу 13).

Лидарное зондирование в декабре 1976 г. выявило отчетливый максимум аэрозольных частиц, поступивших в атмосферу из хвоста кометы Беннета. Пыль проникла в атмосферу вплоть до высот 60 км.

Несмотря на большие успехи лидарного зондирования, еще имеется много трудностей и в его проведении и в интерпретации результатов. Например, при усилении мощности лазерного луча выше определенной возникают нежелательные явления, такие, как электрический пробой, самофокусировка луча лазера, как бы просветление атмосферы перед лучом лазера и другие.

Прожекторное зондирование

Сущность прожекторного зондирования заключается в следующем: луч прожектора, непрерывный или модулированный, т. е. прерываемый с определенной частотой, направляется в атмосферу вертикально или наклонно. Измерение яркости точек в „снопе“ прожекторного луча на разных высотах или фотографирование всего луча чаще всего производится сбоку на некотором расстоянии от прожекторной установки. Далее решается обратная задача: по результатам измерения яркости восстанавливается вертикальный

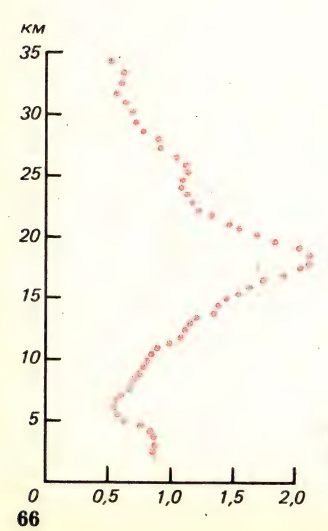


Рис. 7.1. Изменение с высотой средних коэффициентов аэрозольного рассеяния после извержения вулкана Агунг.

профиль объемного коэффициента аэрозольного рассеяния, а по нему — распределение аэрозольных частиц по размерам и их концентрация.

Прожекторное зондирование применимо до высот не более 55 км при фотографировании прожекторного луча и до высот 60—70 км при электрофотометрировании луча.

В высотном ходе коэффициента аэрозольного рассеяния, полученном Л. Элтерманом по осредненным результатам прожекторных зондирований (с декабря 1963 г. по март 1964 г.), выполненных после извержения взрывного типа вулкана Агунг в Индонезии в марте 1963 г. (рис. 7.1), отчетливо видна сильная замутненность слоя атмосферы от 12 до 27 км.

Сумеречный метод

Об этом методе будет подробнее рассказано в главе 13, после изложения общих сведений о процессах, протекающих в сумерки.

Сущность метода состоит в следующем: на протяжении сумерек производится измерение яркости неба в определенном выбранном направлении (в азимуте зашедшего или восходящего Солнца). Обработка результатов сумеречного зондирования, а главное их интерпретация, так же, как и в предыдущих методах, требуют решения обратной задачи теории рассеяния.

Сумеречным методом атмосфера зондируется обычно в интервале высот от 20—30 до 70—80 км. Потолком сумеречного метода считают 130—150 км.

Ракетные методы

Ракетное зондирование уже давно проводится во многих странах мира. Применяется много различных конструкций метеорологических и геофизических ракет, как в СССР, так и в США, Англии, Японии, ФРГ и других странах. В среднем за год осуществляется от 200 до 300 запусков ракет. На ракетах проводятся измерения различных метеорологических параметров (давления, плотности и температуры воздуха, скорости ветра и турбулентности), состава атмосферы, солнечной радиации и излучения атмосферы. Мы остановимся только на измерении излучения атмосферы. Оно складывается из двух компонент: рассеянного света и собственного излучения атмосферы. Выбирая определенные длины волн, можно принимать либо одну, либо другую компоненту.

На ракетах измеряется поле излучения (рассеянного или собственного), создаваемого всей толщей атмосферы, расположенной выше уровня полета ракеты. Иными словами, на ракетах измеряется распределение яркости и поляризации по небесному своду над поднимающейся ракетой.

Характеристики рассеянного света атмосферы на ракетах измеряются следующими приборами: фотометрами, спектрометрами, специальными индикатрисными фотометрами, индикатрисными поляриметрами, как для общего, так и для спектрального потоков. По результатам этих измерений определяют: а) высотное и угловое распределение яркости неба при разных высотах Солнца; б) индикатрисы яркости и индикатрисы рассеяния; в) высотное и угловое распределение поляризационных характеристик рассеянного света и пр.

Обработка всей информации полностью автоматизирована. Все данные вводятся автоматически в ЭВМ. Созданы алгоритмы и машинные программы для обработки всей информации. Далее, как и во всех предыдущих методах, решается обратная задача теории рассеяния: по полученным результатам восстанавливается высотный ход коэффициентов аэрозольного рассеяния (а по ним спектры распределения по размерам аэрозольных частиц на разных высотах). Эта задача в ракетном зондировании решается легче, чем в других методах, так как не мешает яркий фон, создаваемый рассеянием в наиболее плотных нижних слоях атмосферы. Поэтому в ракетных методах легче, чем в других, удается освободиться от влияния многократного рассеяния света и света, отраженного от Земли. Ракетное зондирование дает практически мгновенный разрез всей толщи атмосферы на высотах обычно от 60 до 200 км. В отдельных случаях удавалось провести зондирование до 400—450 км. Ракетные методы можно применять в дневное время, тогда как сумеречный — только в сумерки, а прожекторный и лидарный — ночью (зондированию этими методами в дневные часы мешает яркий фон дневного неба).

Спутниковые методы

Спутниковые методы позволяют получать информацию о многих характеристиках атмосферы в планетарном масштабе и на протяжении больших промежутков времени. На спутниках измеряются все метеорологические и радиационные характеристики, перечисленные при изложении ракетных методов. Кроме того, со спутников ведется наблюдение за облачностью, осадками, измеряется радиационный баланс системы Земля — атмосфера, проводится термическое зондирование атмосферы. Нас интересует измерение рассеянного излучения атмосферы.

Основной радиационной характеристикой, измеряемой со спутников, является поле восходящего, т. е. направленного вверх, рассеянного всей атмосферой солнечного света, а проще, со спутников измеряются спектральные характеристики яркости и поляризация небосвода, „опрокинутого на Землю". Выбираются участки спектра, в которых нет сильных полос поглощения или излучения газов атмосферы (CO_2, H_2O, O_3 и других). За несколько часов полета спутника удается получить информацию о характеристиках рассеяния атмосферы (в определенном направлении наблюдения) со всего земного шара, в том числе и с труднодоступных для наблюдений океанов, пустынь, горных и полярных районов.

Со спутников и орбитальных станций удалось обнаружить и исследовать тонкие слабосветящиеся слои атмосферы при наблюдении их вкось, почти вдоль слоя, под малыми углами к горизонту. При таком наблюдении путь луча зрения в слое, а значит, и яркость рассеянного света увеличиваются во много раз. Со спутников, орбитальных станций и пилотируемых космических кораблей получена интересная информация об аэрозольных слоях, перламутровых и серебристых облаках, полярных сияниях и других явлениях.

Очень много нового дали наблюдения со спутников вблизи сумеречного и дневного горизонтов. Яркий свет сумеречного ореола удавалось измерять с очень больших высот. В создании яркости в сумеречном ореоле главную

роль играет однократно рассеянный свет, дающий наибольшую интенсивность рассеяния под малыми углами.

Измеряя угловое распределение яркости внутри сумеречного ореола и решая обратную задачу теории рассеяния, получают высотный ход коэффициента аэрозольного рассеяния.

Об обратных задачах теории рассеяния

Все описанные косвенные методы зондирования атмосферы основаны на измерении высотного и углового распределения яркости и поляризации рассеянного света. В спутниковом и сумеречном методах измеряется непосредственно яркость солнечного света, рассеянного на разных высотах самой атмосферой. В лазерном и прожекторном зондированиях измеряется на разных высотах яркость рассеянного атмосферой света лазера или прожектора. Здесь небо является фоном, на котором мы видим свет луча лазера или прожектора и яркость которого мешает приему слабого сигнала рассеянного света от этих источников с больших высот.

Обработка результатов измерений всех оптических методов и, главное, их интерпретаций, как мы уже говорили, требуют решения обратных задач теории рассеяния. В каждом методе возникают свои трудности при решении таких задач.

На первых этапах решения обратных задач во всех методах из результатов измерений общей яркости рассеянного света исключают яркость многократно рассеянного света и света, отраженного от земной поверхности. Это необходимо сделать, чтобы получить данные о яркости однократного рассеяния: связи яркости однократно рассеянного света с объемным коэффициентом рассеяния более определенные.

На вторых этапах решения обратных задач по полученным характеристикам яркости и поляризации рассеянного света восстанавливают вертикальный профиль общего объемного коэффициента рассеяния. Он состоит из двух компонент: коэффициента молекулярного рассеяния и коэффици-

Рис. 7.2. Вертикальные профили объемных коэффициентов рассеяния атмосферы, полученные различными методами: *1* — наблюдение с пилотируемого космического корабля „Союз-3“, *2* — прожекторное зондирование, *3* — сумеречный метод. Сплошная кривая — значения коэффициента молекулярного рассеяния.

ента аэрозольного рассеяния. Вычитая на каждой высоте из общей яркости яркость, обусловленную молекулярным рассеянием (а для этого есть готовые таблицы), получают вертикальный профиль коэффициентов аэрозольного рассеяния.

На третьих этапах решения обратных задач по данным о вертикальном профиле коэффициента аэрозольного рассеяния получают микрофизические характеристики аэрозоля на каждой высоте: концентрацию, спектр размеров, а также, желательно, такие их физические характеристики, как состав, показатели преломления каждой фракции и т. д.

Все обратные задачи не имеют строгого решения и в настоящее время решаются приближенными методами, в каждом методе зондирования своим.

На рис. 7.2 приведены вертикальные профили объемных коэффициентов рассеяния, полученные по осредненным данным сумеречных, прожекторных зондирований и по измерениям Г. Т. Берегового с пилотируемого космического корабля „Союз-3". Как видно из рисунка, характер изменения коэффициента рассеяния с высотой по всем методам согласуется довольно хорошо. На высоте около 20 км обнаружен слой повышенной концентрации аэрозоля. Этот довольно устойчивый аэрозольный слой называется слоем Юнге. Значения коэффициентов рассеяния на многих уровнях, определенных разными методами, различаются в несколько раз. Такое значительное расхождение результатов отчасти можно объяснить чрезвычайно большой изменчивостью самого атмосферного аэрозоля, но, в известной степени, и большими ошибками измерений, а также погрешностями, допускаемыми при решении обратных задач теории рассеяния.

Для успешного применения оптических методов зондирования атмосферы требуется как совершенствовать приборы и методику измерений, так и выполнять исследования, обеспечивающие более точное, или, как говорят математики, более корректное решение обратных задач теории рассеяния.

ЗРЕНИЕ ЧЕЛОВЕКА И ВИДИМОСТЬ

8. Наше зрение

Благословляю вас, леса,
Долины, нивы, горы, воды,
Благословляю я свободу
И голубые небеса!

А. К. Толстой

Глаз как приемник света

Мы живем в мире света. Световые потоки от предметов, окружающих нас на Земле, от внеземных источников — Солнца, Луны, звезд и других светил — несут информацию об этих предметах, их взаимном расположении и их движении.

Мы любуемся бесконечным разнообразием окружающего нас мира, богатством цветов, встречающихся в природе и созданных человеком. Мы улавливаем тончайшие цветовые переходы в заре, в полярных сияниях, на картинах художников.

И все это мы видим и воспринимаем с помощью нашего органа зрения — глаза. Глаз человека является удивительным по своему совершенству органом! Считают, что в наземных условиях с помощью зрения человек получает до 80—90% всей информации от внешнего мира. В космосе эта цифра увеличивается до 90—95%. По объему и разнообразию поставляемой информации с глазом пока не может сравниться никакой другой приемник света, созданный человеком, например фотоэлементы, фотопластинки и др.

Как же работает глаз? Мы смотрим на окружающий ландшафт. От всех предметов в поле зрения и, более того, от каждой точки предмета исходят разнообразные световые потоки. Попадая на световоспринимающую оболочку глаза — сетчатку, они вызывают ощущение света. В глаз одновременно поступает множество световых потоков с разнообразными свойствами, и глаз должен их „рассортировать", оценить и, в идеале, воссоздать точное подобие наблюдаемых предметов со всеми их геометрическими и оптическими особенностями.

Чем же различаются световые потоки, приходящие от разных предметов? Прежде всего, как сами предметы, так и световые потоки от них различаются геометрическими параметрами. По существу, глазу задается только направление поступающих лучей, образующих телесные углы, под которыми мы видим предметы. Далее, потоки характеризуются яркостью или интенсивностью и спектральным составом. Кроме того, они характеризуются состоянием и степенью поляризации.

Первая, или геометрическая, часть задачи всем знакома еще из средней школы. Напомним только, что с помощью оптической системы глаза,



Рис. 8.1. К зрению двумя глазами.

в которую входят роговица, жидкости, заполняющие переднюю и заднюю камеры глаза (водянистая и стекловидная влага), и хрусталик, изображение предметов на сетчатке получается действительным, уменьшенным и перевернутым.

Мерой оценки расстояния до предмета является психологически — бессознательная оценка угла между оптическими осями обоих глаз, а физиологически — степень натяжений мышц, необходимая для сведения оптических осей при наблюдении близкого предмета A (угол α_1 на рис. 8.1) и далекого B (угол α_2). Каждый глаз в отдельности дает плоскую картину, пространственность изображения (стереоскопичность) получается за счет зрения двумя глазами.

Читатель может сразу же возразить. Вот я закрыл один глаз, а другим смотрю на окружающие предметы и хорошо вижу, что близко, а что далеко. Действительно, и при наблюдении одним глазом мы все же получаем некоторое представление о расстояниях до предметов. Это достигается в основном за счет прежнего опыта и привычки наблюдения знакомых предметов двумя глазами. Помогает в этом и атмосферная дымка, сильнее покрывающая более удаленные предметы.

Если хотите убедиться, что одним глазом расстояние оценивается не всегда надежно, проделайте такой простой эксперимент. Сядьте, закройте один глаз и на вытянутых, но расслабленных руках попробуйте свести кончики двух карандашей, а еще лучше двух вязальных спиц, держа их за другие концы. Оказывается, не всем и не всегда удается это сделать. При наблюдении одним глазом часто кончики не сводятся в одну точку. Правда, и зрение двумя глазами не всегда гарантирует от ошибок в оценке видимых размеров или расстояния до предметов. Типичным примером такого оптического обмана является кажущееся увеличение Солнца, Луны и других предметов у горизонта, о чем уже говорилось в главе 3.

Дневное и ночное зрение

На световоспринимающей оболочке глаза — сетчатке имеются два вида светочувствительных элементов: утолщенные и короткие называются колбочками, а более тонкие и длинные — палочками. Колбочки располагаются в основном в центре сетчатки, их число быстро уменьшается к ее периферии. Палочки, наоборот, занимают главным образом периферические части сетчатой оболочки. Колбочек имеется около 7 млн., палочек —130 млн. Изображение каждого предмета на сетчатке глаза, подобно мозаичной картине, составляется из огромного количества отдельных, точечных ощущений.

Колбочки восприимчивы только к достаточно яркому свету и поэтому работают днем. Палочки способны реагировать только на слабые световые потоки и работают в сумерки и ночью. В сумеречное время частично работают и колбочки.

В соответствии с двумя видами световоспринимающих элементов и их расположением на сетчатке различают *дневное зрение* (его также называют *центральным*) и *ночное*, или *периферическое*.

Необходимость в дневном и ночном зрении у человека обусловлена тем, что освещенность земной поверхности и яркость предметов на Земле при смене дня ночью и наоборот изменяются в таких широких пределах, что один зрительный аппарат не в состоянии обеспечить весь этот невероятно большой диапазон. Приведем цифры.

Освещенность летом в дневные часы при больших высотах Солнца может достигать 10^4 и даже 10^5 лк, к началу сумерек она составляет около 500 лк, а к концу сумерек в безлунную ночь освещенность уменьшается до 10^{-4} — 10^{-5} лк. В соответствии с освещенностью изменяется и яркость окружающих предметов. Таким образом, на протяжении суток освещенность и яркость изменяются в миллиарды раз!

Ни один из созданных человеком к настоящему времени приемников света не может обеспечить восприятие световых потоков в таком диапазоне изменения их яркости. В этом отношении глаз человека является уникальным приемником света.

Адаптация

Удивительная приспосабливаемость зрения человека к восприятию окружающих предметов при изменении их яркости и освещенности в таких больших пределах называется адаптацией. Различают два вида адаптации в зависимости от направления перехода: световую и темновую. При смене дня ночью протекает темновая адаптация, при переходе от ночи ко дню — световая. Адаптация осуществляется за счет ряда процессов, протекающих в глазу. Назовем только некоторые из них. При изменении уровня освещения меняется площадь отверстия зрачка, пропускающего в глаз световые потоки. Например, из ярко освещенной комнаты мы вошли в темную. Что мы делаем, чтобы в темноте что-то рассмотреть? Широко открываем глаза. Диаметр зрачка увеличивается в 4—5 раз, а его площадь в 15—25 раз. Наоборот, вы попали из темного помещения на яркий солнечный свет. Что мы делаем в этом случае? Щуримся, стараясь быстро сократить площадь зрачка, чтобы уменьшить световые потоки, поступающие в глаз.

При быстрых сменах малой освещенности на большую возникают слишком сильные световые раздражения палочек. Могут возникнуть перераздражения и колбочек, если взглянуть даже на короткое время на сильные источники света, такие, как Солнце, дуга, прожектор и т. п. Для защиты палочек и колбочек от опасных для них перераздражений со дна сетчатки быстро поднимаются особые черные клетки, почти непрозрачные, прикрывающие палочки и колбочки. Но, бывает, и этой защиты мало. Например, взглянув на Солнце, вы отвернулись от него, но у вас еще некоторое время стоит перед глазами темное пятно. Это перераздраженное, больное место сетчатки. Даже кратковременные наблюдения слепящих источников вредны для глаза, может произойти разрушение структуры сетчатки, и эти места потеряют способность видеть свет.

Главным же фактором, обеспечивающим адаптацию, является переключение с колбочкового аппарата на палочковый — при темновой адаптации и с палочкового на колбочковый — при световой.

Процесс адаптации происходит не мгновенно, на ее завершение требуется некоторое время. Световая адаптация протекает довольно быстро — для нее обычно достаточно нескольких минут. Например, вы были днем в кинотеатре, где уровень освещения довольно низок. По окончании сеанса вы сразу вышли на яркий солнечный свет. В первый момент вы „ослеплены“, щуритесь, выступают слезы, но через 2—3—4 минуты вы уже привыкли к яркому свету.

Темновая адаптация протекает значительно медленнее. Чтобы глаза полностью адаптировались к темноте, надо пробыть в темном помещении не менее получаса. Все водители наземного и воздушного транспорта хорошо знают, что во избежание аварий и катастроф необходимо избегать в темное время внезапных освещений глаза ярким светом, так как нарушается темновая адаптация глаза и водитель некоторое время плохо видит окружающие предметы и сигнальные огни. На шоссейных дорогах, в частности, автомобили должны выключать фары, чтобы не ослеплять водителей встречных машин.

В одном из эпизодов сражения за Берлин в мае 1945 г. особенности адаптации были удачно использованы нашими войсками. При подготовке крупной ночной атаки командование сосредоточило на переднем крае более 200 мощных прожекторов. С наступлением темноты свет сотен прожекторов по команде „ударил“ в глаза гитлеровских солдат и буквально ослепил их. Они ничего не видели впереди себя, советские же войска отлично видели хорошо освещенные цели, всю технику противника и били без промаха. Казавшиеся неприступными позиции гитлеровцев были взяты. Этот удачный тактический прием спас жизни многим тысячам советских воинов.

Цветовое зрение

Остановимся еще на одном, важном для нашей жизни, различии колбочкового и палочкового аппаратов. Колбочки обладают способностью цветового восприятия. Все богатство цветов и красок, имеющееся в природе, все тончайшие переходы от одного цвета к другому мы видим с помощью колбочкового зрения.

Сколько же цветов различает глаз? С детства все знают, что в видимом спектре семь цветов. О порядке расположения цветов говорит известное правило: „Каждый охотник желает знать, где сидят фазаны“. В действительности в видимом диапазоне (0,40—0,76 мкм) заключено бесконечное множество оттенков, так как один цвет постепенно переходит в другой. В различении цветов могут быть большие индивидуальные отклонения у отдельных людей, но в среднем человек с нормальным зрением способен отличить до 350—400 цветов и оттенков, т. е. может улавливать изменение длины волны излучения до тысячной доли микрометра.

Палочковое зрение ахроматичное, неокрашенное. Все предметы, воспринимаемые с помощью этого зрения, мы видим однотонными, серо-зелеными. Палочки реагируют лишь на уровень яркости, отмечают, что ярче, т. е. светлее, а что темнее. Ночью мы становимся цветослепыми. Эта особенность ночного зрения нашла отражение в меткой народной пословице: ночью все кошки серые.

Интересно отметить, что на сетчатой оболочке глаза типичных дневных животных, таких, как куры, голуби, имеются только колбочки. Поэтому они хорошо видят днем и перестают видеть в сумерки и ночью. Отсюда пошло название болезни людей, страдающих расстройством палочкового аппарата и потому плохо видящих с наступлением темноты,— „куриная слепота“. У типичных ночных животных — сов, летучих мышей — на сетчатке находятся почти одни палочки, и они практически не видят днем.

Наличие на сетчатой оболочке глаза человека и колбочкового и палочкового аппаратов, обеспечивает нам счастливую возможность жить в богатейшем мире цвета и света. Однако не все люди обладают полноценным цветовым зрением. По данным мировой статистики, на земном шаре страдают разного рода расстройствами цветового зрения около 130 млн. человек. Чаще это наблюдается у мужчин — примерно 2% мужчин имеют какие-либо дефекты цветового зрения. У женщин они встречаются сравнительно редко — не более чем у 0,5%. Наиболее распространенной является красно-зеленая слепота, или дальтонизм, при которой не отличают красных тонов от зеленых. Термин „дальтонизм“ произошел от фамилии известного химика и физика Дальтона, который, сам страдая этим дефектом зрения, его исследовал.

Неоднократно описывались случаи аварий на железнодорожном транспорте по вине машиниста, причем впоследствии устанавливалось, что он страдал дальтонизмом. При определенных условиях освещения машинист не мог отличить красный стоп-сигнал от зеленого, отчего и происходила авария.

В настоящее время при приеме на обучение ряду специальностей (шофера, машиниста электровоза, летчика, космонавта) проверяется полноценность цветового зрения. Дефекты в различении цветов обнаруживаются с помощью специальных приборов (спектральных аномалоскопов) или таблиц. В СССР широко используются удобные в работе таблицы Рабкина.

Эффект Пуркинье

На рис. 8.2 показаны кривые *спектральной чувствительности глаза* человека $V(\lambda)$ днем и в сумерки и ночью. Функция $V(\lambda)$ измеряется в относительных единицах. Для желто-зеленых лучей с длиной волны 0,556 мкм, к которым глаз наиболее чувствителен днем, значение функции $V(\lambda)$ принято равным 1.

Дневная кривая *1* от максимума $V(\lambda)$, равного 1 для желто-зеленых лучей, очень быстро снижается до нуля как в сторону фиолетовых (0,40 мкм), так и в сторону красных (0,76 мкм) лучей. Сумеречная кривая *2* повторяет форму дневной *1*, но смещена относительно нее в сторону более коротких длин волн. Ее максимум приходится на длины волн 0,507—0,510 мкм, что соответствует уже зеленому цвету.

Кривые спектральной чувствительности глаза часто для краткости называют *кривыми видности*. Поскольку сумеречное и ночное зрение ахроматично, кривую видности *2* следует понимать следующим образом: при одинаковой интенсивности всех цветных лучей видимого спектра наиболее ярким, т. е. самым светлым, глазу кажется зеленый луч, а к обоим концам видимого диапазона яркость цветных лучей уменьшается до нуля. С длинноволнового

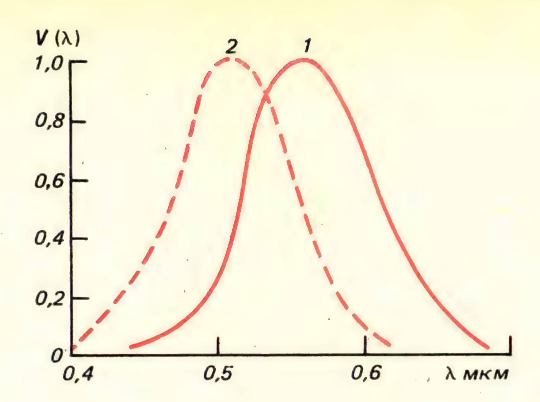


Рис. 8.2. Спектральная чувствительность глаза человека:
1 — днем, *2* — в сумерки и ночью.

конца спектр обрывается на оранжевом цвете. Красный цвет лежит за пределами кривой видности, т. е. глаз к нему не чувствителен.

Такое изменение кривой спектральной чувствительности глаза при уменьшении освещенности до уровня сумеречной и ночной впервые было изучено чешским ученым Пуркинье и получило название эффекта Пуркинье. На первый взгляд может показаться, что смещение кривой видности *2* по сравнению с *1* мало, всего около 0,05 мкм, и что не стоит обращать на него внимание. Однако это не так. Поскольку световой диапазон чрезвычайно узок — вся его „длина" около 0,36 мкм, смещение кривой видности *2* составляет около 14% от общей протяженности светового диапазона.

С проявлениями эффекта Пуркинье мы сталкиваемся в повседневной жизни, в быту, с ним приходится считаться в ряде отраслей промышленности (например, при изготовлении и применении красителей). Приведем пример явления, знакомого многим из повседневной жизни, но, по-видимому, не всем понятного. В ясный солнечный день летом вы видите на клумбе два цветка: красный мак и синий василек. Оба цветка имеют насыщенные цвета, мак кажется даже более ярким. А теперь вспомните, как выглядят эти цветы в сумерки и ночью. Мак, как и любые красные цветы, герань, сальвии, гвоздики, кажется черным, а василек стал светло-серым. Почему так изменилось цветовое восприятие этих цветков? Объясняется это тем, что красный цвет (кривая *2* рис 8.2) лежит за пределами кривой видности сумеречного зрения. Красные лучи перестали производить световое раздражение сетчатки, поэтому мак и выглядит черным. А почему василек стал светло-серым? Причина этого в ахроматичности палочкового аппарата.

А вот другой пример. Взгляните днем на разноцветный ковер, в котором имеются красные, оранжевые тона, а также зеленые, голубые или синие, а затем посмотрите на него в сумерки или ночью. При слабом освещении все красные и оранжевые цвета как бы „тонут", т. е. темнеют, а зеленые, голубые — „выпирают", становятся более светлыми. Создается впечатление, что днем это был совсем другой ковер.

Об этом явлении знали еще вышивальщицы в Древней Греции: работая при светильниках, они часто ошибались в расцветках, принимая одни за другие.

С влиянием эффекта Пуркинье приходится считаться астрономам при фотометрировании (т. е. сравнении яркости) звезд разного цвета.

С двумя примерами проявления эффекта Пуркинье мы уже встречались при объяснении особенностей лунных гало и радуг. Напомним, что у кругов гало, образованных лунными лучами, внутренняя сторона, обращенная к Луне, выглядит как почти черная полоса, окаймляющая общее светлое кольцо гало, что особенно заметно на фоне неба, более светлого внутри гало, чем вовне его. Отсутствие красной или оранжевой дуги у лунных радуг не так бросается в глаза ввиду того, что между красными дугами первой и второй радуг располагается полоса неба более темная, чем части неба со стороны фиолетовых дуг. Отсутствие красного цвета у лунных радуг и гало объясняется полной потерей чувствительности к красным лучам сумеречного и ночного зрения человека.

Попробуем разобраться, почему спектральная чувствительность глаза изменяется при переходе ото дня к ночи и наоборот. Чем обусловлена форма кривых *1* и *2* рис. 8.2 и пределы спектральной чувствительности глаза днем и ночью? Установлено, что причиной этих изменений является смена дневных источников освещения земной поверхности на ночные.

Форма дневной кривой видности с максимумом, приходящимся на желто-зеленый свет (0,556 мкм), повторяет форму средней кривой распределения энергии в солнечном свете, отраженном зеленой растительностью. В безлунные ночи освещенность земной поверхности создается ночным свечением атмосферы, светом звезд и рассеянным солнечным светом. Максимум суммарной кривой распределения энергии всех ночных источников вместе взятых приходится на интервал длин волн 0,507—0,510 мкм, на который и смещается максимум ночной кривой видности.

Таким образом, в процессе длительной эволюции человека его зрение приспособилось к жизни среди зеленой растительности, освещенной солнечным светом днем, и к свету, исходящему от ночного неба, в темную часть суток.

Абсолютный порог световосприятия

Как уже говорилось, темновая адаптация протекает медленно. Оказывается, и после получасового пребывания в темноте продолжается, хотя и очень медленное, увеличение чувствительности палочкового аппарата к свету. Зададимся таким вопросом: где же лежит или чему равна нижняя граница световосприятия? Для ее определения проделали такой эксперимент. Человека с нормальным зрением поместили в совершенно темную комнату, где он был не менее часа. Специальный экран освещался зеленым светом с длиной волны 0,507 мкм, к которой наиболее чувствителен в условиях низкого уровня освещения палочковый аппарат. Сначала экран был темным, затем его освещенность медленно увеличивалась. Человек должен был сказать, когда он увидит свет.

По измерениям академика С. И. Вавилова минимальное количество световой энергии, вызывающее световое раздражение сетчатки глаза че-

ловека в условиях полной темновой адаптации, составляет $3{,}1 \cdot 10^{-18}$ Вт для длины волны 0,507 мкм. Эту величину назвали абсолютным порогом светоосприятия. Световой поток, исходящий от экрана в описываемом эксперименте, составлял около 10^{-13} лм.

Даже трудно представить себе, насколько мал абсолютный порог светоосприятия! Давайте подсчитаем, сколько квантов в секунду с длиной волны 0,507 мкм испускает источник, энергия которого равна абсолютному порогу светоосприятия.

Для решения задачи надо $3{,}1 \cdot 10^{-18}$ Вт разделить на энергию 1 кванта ($h\nu$) с длиной волны 0,507 мкм. Здесь h — постоянная Планка, равная $6{,}6 \cdot 10^{-34}$ Дж·с, ν — частота. Она связана с длиной волны λ и скоростью света c соотношением $\nu = c/\lambda$. Ответ получается 8 квантов в секунду! То есть, чтобы глаз увидел свет, достаточен поток в 8 квантов в секунду!

Представим себе, что у нас имеется источник, излучающий энергию, по величине равную абсолютному порогу светоосприятия, и что мы можем эту энергию накапливать. Как вы думаете, сколько времени придется собирать эту энергию, чтобы набрать ее количество, достаточное для нагревания 1 г воды на 1° С? Иначе говоря, набрать 1 малую калорию? Оказывается, для этого понадобится $4 \cdot 10^{10}$ лет — миллиарды лет! А глаз видит, воспринимает такой величины поток мгновенно! Вот какой удивительно высокой чувствительностью к свету обладает палочковый аппарат нашего зрения.

Как же достигается столь высокая чувствительность к свету палочкового зрения? Как мы уже говорили, палочек на сетчатке много, около 130 млн., и они расположены по всей сетчатке, главным образом по периферии. За счет этого изображение предметов, создаваемое палочковым зрением, теряет в качестве в сравнении с дневным. Изображение ночью получается менее четким, в основном мы видим только контуры предметов. К отдельным окончаниям зрительного нерва на периферических частях сетчатки присоединяются по 100—200 и даже по 400 палочек. Поэтому если световое раздражение отдельной палочки недостаточно, чтобы передать сигнал в мозг, то суммарное раздражение 200, а тем более 400 палочек уже оказывается способным послать в мозг сигнал достаточной интенсивности. Этим подключением большого числа палочек к одному окончанию зрительного нерва и создается такая необыкновенно высокая чувствительность к слабым световым потокам у палочкового зрения.

Острота зрения

Приведем еще несколько пороговых характеристик нашего зрительного аппарата, хотя в их названиях нет слова порог. Это, прежде всего, острота зрения, или разрешающая способность глаза. Обозначим ее V. $V = 1/\delta_{\min}$, где $\delta_{\min}$ — минимальный разрешаемый угол или минимальный угловой поперечник предмета. Если условия освещения и контраст предметов с фоном достаточны, среднее значение $\delta_{\min}$ составляет 1—2′. Поясним эти цифры. Предмет, угловой поперечник которого больше 1′, мы видим как протяженный предмет, меньше 1′ — как точку. В достаточно темную ночь две близкие звезды или два огня мы видим каждый в отдельности (разрешаем их), если угол между ними больше 1′, если угол меньше 1′, то они сливаются

в одну звезду или в один огонь. Под углом в 1′ видна булавочная головка с расстояния около 3 м. Встречаются люди с необыкновенно зорким зрением, которые глазами видели то, что видно только в телескоп, например спутники Юпитера, близкие двойные звезды. Еще до изобретения телескопов некоторые люди различали так называемые „рога" Венеры, когда она видна в виде узкого серпа. Уже в сочинениях древних авторов встречаются изображения Венеры в виде двурогой человеческой фигуры.

С уменьшением освещенности, например с наступлением ночи, минимальный разрешаемый угол увеличивается, а острота зрения уменьшается. Если днем можно увидеть объект с поперечником в 1′, то ночью плохо виден объект с поперечником в 1°.

Для сравнения скажем, что минимальный угол, разрешаемый в хорошие современные телескопы, имеет порядок 0,12″. Как вы думаете, какой должна быть минимальная ширина объектов на Марсе, называемых иногда „каналами", чтобы их можно было увидеть в телескоп в моменты противостояния Земли и Марса, когда расстояние между ними составляет $78 \cdot 10^6$ км? Оказывается, не менее 47 км! Вряд ли эти образования можно назвать „каналами" в нашем земном понимании.

Наш глаз как приемник света отличается малой инерционностью. Промежуток времени между воздействием света на сетчатку и возникновением соответствующего зрительного ощущения называется *постоянной времени ощущения*. Она колеблется в пределах 0,02—0,2 с, что совсем немного, учитывая, что глаз одновременно воспринимает большой объем информации.

Глаз человека способен длительное время работать, выполняя все функции с большой надежностью.

Почему световое „окно" в окружающий мир лишь узкая „щелочка"?

Длины большого семейства электромагнитных волн изменяются в очень широких пределах. Они составляют километры у длинных радиоволн и уменьшаются до миллиардных долей сантиметра (10^{-9} см) у коротких рентгеновских лучей. На фоне такого гигантского диапазона изменения длин электромагнитных волн (от 10^3до 10^{-11} м) световой диапазон ($0{,}40 \cdot 10^{-3}$—$0{,}76 \times 10^{-3}$ м) выглядит просто узенькой „щелочкой", на протяжении которой длина волны изменяется меньше чем в два раза.

Весь свет, с помощью которого мы получаем всю световую и цветовую информацию из окружающего мира, „укладывается" почти в $^1/_3$ мкм! В столь узенькой „щелочке" заключено все богатство цветов и красок мира!

Чем же объяснить, что световые волны заключены в такие „тесные границы"? Случайно ли это? Нет, не случайно! Покажем, что световой диапазон не может быть шире. Начнем с коротковолнового конца видимого спектра.

Лучи с длиной волны короче 0,4 мкм называются ультрафиолетовыми или сокращенно УФ-лучами. Они обладают большой энергией квантов. Величина кванта, как известно, равна $h\nu$, где h — постоянная Планка ($6{,}6 \cdot 10^{-34}$ Дж·с), а ν — частота электромагнитной волны. УФ-лучи в силу большой энергии их квантов производят химическое разрушение органических веществ, оказывают сильное действие, порой губительное, на живые

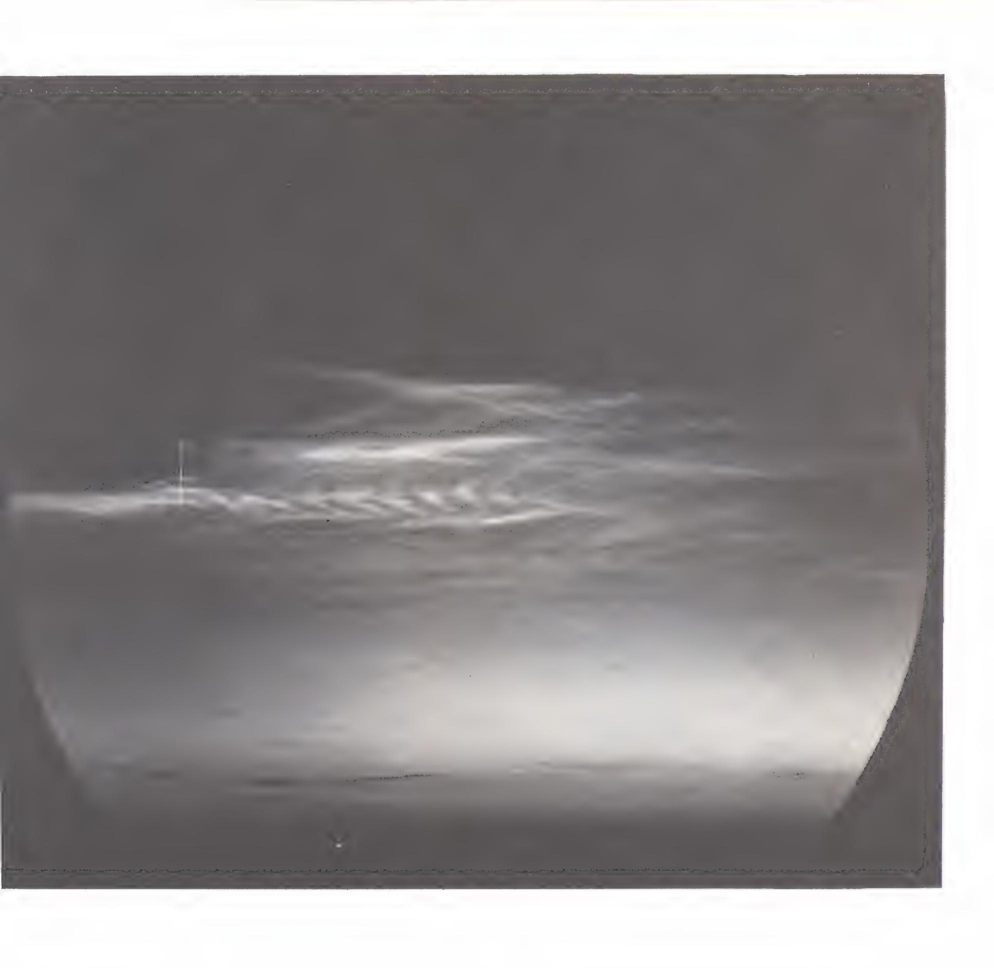
организмы. Это свойство УФ-лучей используется в бактерицидных лампах.

Кожа человека, подвергнутого умеренному облучения УФ-лучами, покрывается загаром. Загар — это темная пигментация кожи. Она представляет собой защитную реакцию кожного покрова на проникновение большого количества УФ-лучей, такая пигментация кожи предохраняет от дальнейшего попадания в ткани больших доз губительных УФ-лучей. Неумеренное облучение человека УФ-радиацией, желание загореть в короткий срок, приводит к серьезным ожогам, воспалению кожи и даже к болезням крови. Длительное облучение глаза человека УФ-радиацией может привести к слепоте. На облучение человека дозами радиации выше допускаемых одним из первых органов реагирует глаз.

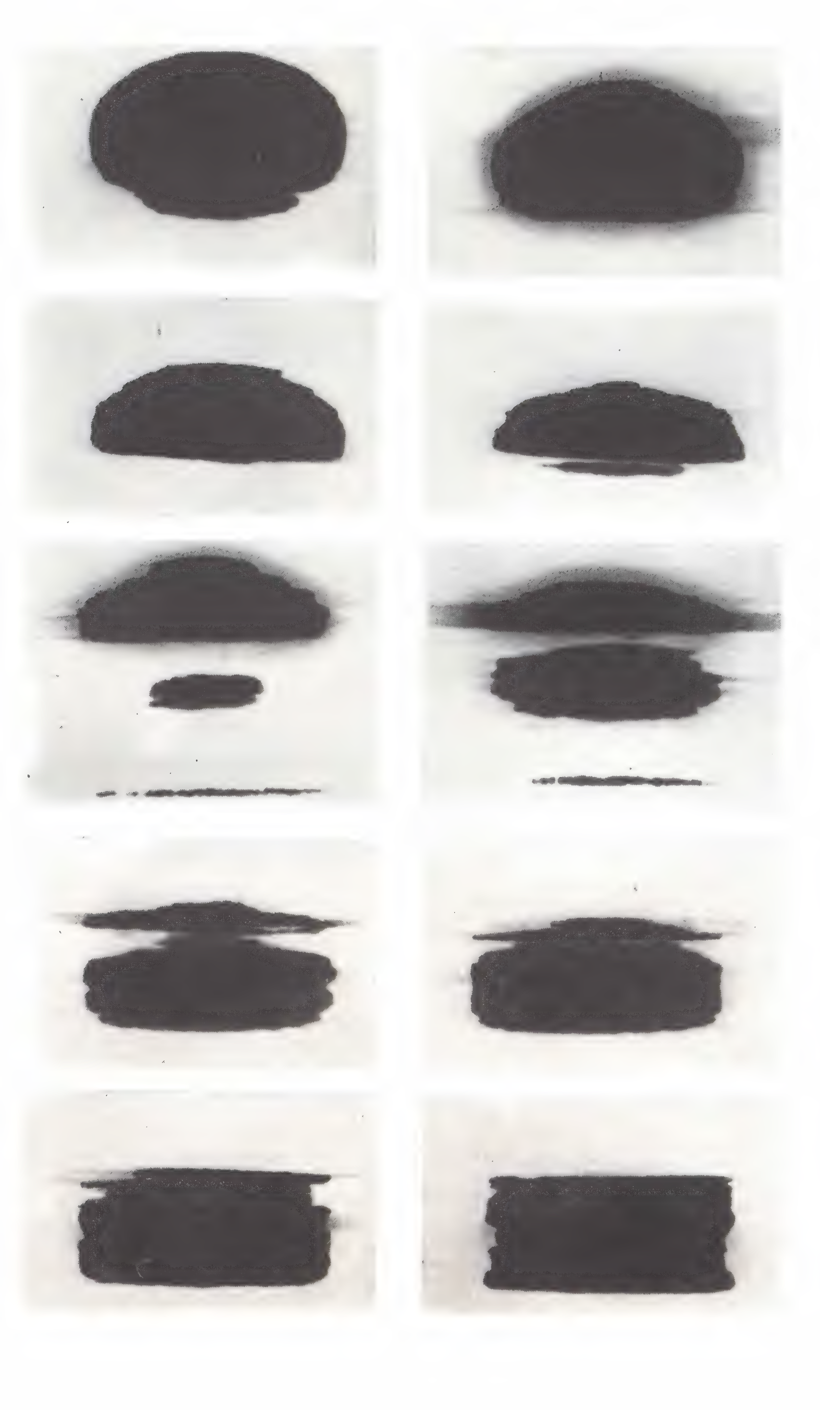
УФ-лучи не попадают в глаз, так как поглощаются хрусталиком. И хотя сетчатка и чувствительна к УФ-лучам, световой диапазон, благодаря защитной роли хрусталика, обрывается на 0,40 мкм.

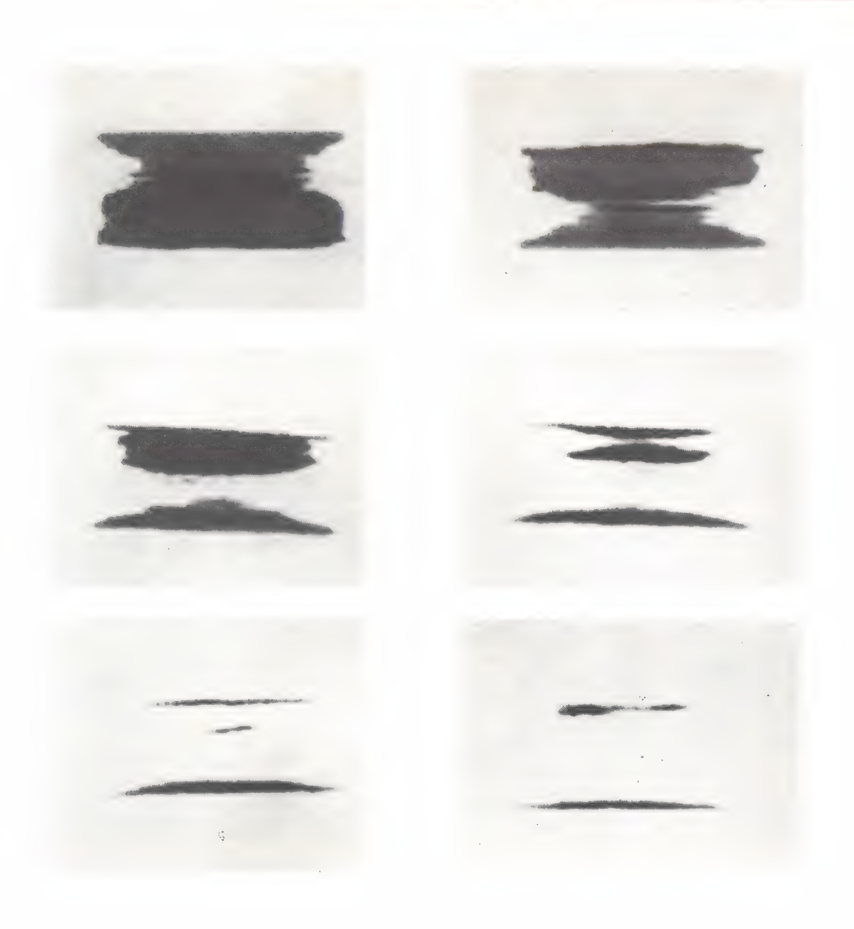
Теперь обратимся к длинноволновому, красному краю светового диапазона. Лучи с длиной волны более 0,80 мкм называют инфракрасными или ИК-лучами. К ним глаз не чувствителен. Глаз не мог бы работать как орган зрения, если бы он воспринимал ИК-лучи. Максимум собственного теплового излучения глаза при температуре тела человека около 37° С приходится на длины волн 9—10 мкм. Можно показать несложными расчетами, что если бы глаз воспринимал ИК-лучи с такой чувствительностью, какую он имеет к желто-зеленым, то собственное излучение глаза составляло бы 5 млн. кд! Естественно, что при наличии такого мощного „прожектора“ в собственном глазу, мы не могли бы видеть ничего вокруг. Глаз не мог бы выполнять функции органа зрения.

Итак, в силу указанных причин световые волны оказываются заключенными в тесные границы от 0,40 до 0,76 мкм. Приходится только удивляться, что, наблюдая окружающий мир сквозь такую узкую „щелочку“ светового диапазона, глаз человека способен воспринимать богатейшую цветовую гамму, улавливать малейшие изменения в цветовом тоне или в яркости. Этому в значительной степени помогают особенности спектральной чувствительности глаза, которые наглядно отражаются в острой форме кривой видности. Даже самые небольшие изменения длины волны света (т. е. цвета лучей) сопровождаются заметным изменением спектральной чувствительности глаза к новому цвету. Это и приводит к тому, что помимо имеющегося различия в цвете, например, двух соприкасающихся предметов, близких по цвету, появляется существенный дополнительный контраст по яркости, который помогает отличить один предмет от другого, т. е. увидеть их.



Серебристые облака. Вид из космоса. (Фото Ч. Вилмана)





Искажения диска Солнца при заходе за счет рефракции. Май 1984 г., побережье Чукотки. Такого характера искажения формы солнечного диска имеют место, если у самой поверхности Земли располагается холодный воздух, а выше него лежит теплый слой. Неровные края солнечного диска, наличие как бы зазубрин, выемок говорит о том, что таких границ раздела холодный — теплый воздух не одна, а несколько. Иногда одна из выемок становится настолько глубокой с обеих сторон, что от верхушки Солнца отрезается целая полоса, как это произошло на фотографиях 11—14. (Фото С. В. Загоруйко)



Фата-моргана, наблюдавшаяся на побережье Чукотки 15 мая 1984 г. (Фото С. В. Загоруйко)

Извержение вулкана. После извержений вулканов взрывного типа наблюдаются самые красивые, самые яркие зори с интенсивным развитием пурпуровых тонов. (Фото В. Е. Гиппенрейтера)







Комета Галлея в свой приход в окрестности Земли в 1986 г. Ее появление на земном небосклоне удалось проследить до 240 г. до нашей эры. В 1986 г. она появилась в 30-й раз.

Газовая туманность. Розетка находится в нашей Галактике. Темные места на фотографии — пылевые облака.



Туманность в созвездии Андромеды. Одна из наиболее близких галактик, находится на расстоянии порядка 10^6 световых лет.

9. Глаз и видимость

Смотри вдаль — увидишь даль;
смотри в небо — увидишь небо;
взглянув в маленькое зеркальце,
увидишь только себя.

Козьма Прутков

Яркостные и цветовые различия предметов

Подавляющее большинство окружающих нас на Земле предметов мы видим благодаря тому, что они отражают падающий на них свет. Такие предметы принято называть, в отличие от огней, несамосветящимися. Отражательная способность у предметов разная, поэтому они и выглядят по-разному. Например, заснеженное поле — белое, так как снег отражает почти весь падающий на него световой поток, а свежевспаханное — почти черное, так как у него низкая отражательная способность, большую часть падающих лучей оно поглощает. Зеленая растительность потому и зеленая, что преимущественно отражает желто-зеленые лучи, а строения из красного кирпича или красноватые пески, глины отражают главным образом оранжевые, желтые или красные лучи, и т. д.

Однако для того чтобы увидеть предмет, недостаточно, чтобы какая-то часть отраженных им лучей попала в глаз. Восприятие любого предмета, находящегося от нас на любом расстоянии, и близко, и далеко, возможно лишь в том случае, если в глаз попадут лучи не только от этого предмета, но и от окружающих его других предметов, отличающихся от него либо по яркости, либо по цвету, а чаще и по тому и по другому.

Разнообразные предметы, существующие на Земле, отличаются друг от друга яркостью и цветом. Это заложено в их природе. Глаз же человека в процессе длительной эволюции приспособился к восприятию этих контрастов.

Чтобы убедиться, что мы видим любые предметы благодаря наличию яркостных и цветовых контрастов, посмотрите вокруг себя. Где бы вы ни находились, восприятие любых предметов в поле вашего зрения обусловлено различиями их по яркости и цвету с другими предметами, видимыми рядом с ними. Если вы находитесь в комнате, то стоящая там мебель, все предметы, висящие на стенах (картины, часы и т. п.),— все красноречиво говорит об этом.

„Белая тьма“

Полярные летчики знают, как трудно посадить самолет на заснеженную равнину, если вокруг мало или вообще нет предметов, по видимости которых можно оценить высоту самолета над Землей. При солнечном освещении предметы на Земле видны лучше благодаря отбрасываемым ими на снег теням. Посадка становится трудной, а иногда невозможной при ярком рассеянном освещении, когда тени от наземных предметов исчезают

6 Зак. 809

совсем. В англоязычной литературе это явление называют whiteout. В русском языке этому названию нет удачного эквивалента. Его переводят поразному: белая тьма, белая мгла, эффект белизны, белящий эффект и т. д.

Наблюдается это явление чаще всего в полярных широтах при наличии снежного покрова и однорядной облачности типа высоко-слоистых или перисто-слоистых облаков, затягивающих все небо. При этих условиях создается большая освещенность рассеянным светом, а контрасты наземных предметов с фоном пропадают.

В Антарктике такие условия часто создаются на станциях, расположенных на антарктическом склоне (Пионерская, Восток-1). Здесь сильные стоковые ветры поднимают в воздух облака снежной пыли. Снежные облака бывают настолько плотными, что окружающих предметов не видно уже на расстоянии вытянутой руки. Диск Солнца перестает быть видимым, а яркость снежного облака настолько велика, что человек, в нем находящийся, буквально ослепляется обилием света. В таких условиях пилоты не только не могут посадить самолет, но даже теряют ориентировку на местности.

Яркостный контраст и порог контрастной чувствительности глаза

До сих пор наши суждения о контрастах имели чисто качественный характер. Теперь попробуем оценить контрасты количественно. Начнем с определения яркостного контраста. Обозначим яркость наблюдаемого предмета $B_п$, а яркость фона, на котором он виден, $B_ф$. *Яркостный контраст* K равен отношению абсолютного значения разности яркостей предмета и фона ΔB к большей из них:

$$K = \Delta B / B. \qquad (9.1)$$

Способность нашего глаза воспринимать яркостный контраст, т. е. относительную величину изменения яркости при наблюдении любых предметов, и составляет основной психофизический закон зрительного восприятия Вебера — Фехнера.

Если предмет темнее фона, т. е. $B_ф > B_п$, то

$$K = \frac{B_ф - B_п}{B_ф}. \qquad (9.2)$$

Если предмет светлее фона, т. е. $B_п > B_ф$, то

$$K = \frac{B_п - B_ф}{B_п}. \qquad (9.3)$$

Для черного предмета на белом фоне, например куска черного бархата на белой скатерти или черной вспаханной земли на фоне окружающего поля, еще покрытого снегом, $B_п = 0$ и $K = 1$ (или 100%).

Если яркости предмета и фона равны, т. е. $B_п = B_ф$, то $K = 0$ (или 0%). Таким образом, K изменяется в пределах 0—100%. Чем больше K, тем лучше, отчетливее виден предмет на данном фоне, и наоборот.

Будем уменьшать яркостный контраст между предметом и фоном, сближая их яркости. Сначала мы наблюдали черный предмет на белом фоне, его яркостный контраст был равен 100%. Затем предмет стал темно-серым, а наблюдаем его на том же белом фоне. Затем серым, светло-серым и т. д. Когда же мы перестанем видеть этот предмет, т. е. отличать его от фона? Оказывается не тогда, когда яркость предмета станет равной яркости фона, а немного раньше, когда контраст еще больше нуля. То минимальное значение яркостного контраста, при котором мы еще отличаем предмет от фона в данных условиях наблюдения, называется *порогом контрастной чувствительности глаза* (ε).

$$\varepsilon = \min \frac{\Delta B}{B}, \quad (9.4)$$

где B — большая из яркостей $B_ф$ или $B_п$, ΔB — абсолютное значение разности $B_ф$ и $B_п$.

Таким образом, из всех окружающих нас предметов мы видим только те, яркостный контраст которых с фоном в данных условиях наблюдения больше порога контрастной чувствительности глаза.

Сколько же у глаза порогов?

Сразу ответим — много! Об абсолютном пороге световосприятия уже говорилось выше. Оказывается, порогов контрастной чувствительности глаза несколько. Поясним, в чем дело.

Дальностью видимости любого предмета называется расстояние, на котором мы перестаем видеть предмет. Однако условия определения дальности видимости могут быть различными. Если мы непрерывно наблюдаем за удаляющимся предметом, то то расстояние, на котором мы перестаем видеть предмет даже в виде едва различимого пятна на фоне неба у горизонта или на фоне дымки, называется *дальностью потери видимости*. Если мы увидели на фоне неба или дымки едва различимое пятно, но еще не в состоянии установить, что это такое, дальность видимости называется *дальностью обнаружения*. Наконец, когда неизвестный предмет приблизился настолько, что мы узнали, что это такое, дальность видимости называется *дальностью узнавания* предмета. Обозначим три дальности видимости соответственно $S_{пв}$, $S_{обн}$, $S_{узн}$.

В трех перечисленных примерах речь идет о наблюдении за одним и тем же предметом при одинаковых условиях освещения и прозрачности воздуха. Будут ли три рассмотренные дальности видимости равными по величине? Нет, не будут. Очевидно, что $S_{пв} > S_{обн} > S_{узн}$.

Что же менялось от одного примера к другому? Менялись только условия задачи, которую решал глаз. Величина каждой дальности видимости определялась своим порогом контрастной чувствительности глаза. Обозначим эти пороги $\varepsilon_{пв}$, $\varepsilon_{обн}$ и $\varepsilon_{узн}$.

Соотношение между порогами, очевидно, будет обратным соотношению соответствующих дальностей видимости, т. е. $\varepsilon_{пв} < \varepsilon_{обн} < \varepsilon_{узн}$.

Численные значения этих порогов, по измерениям различных авторов, выполнявших наблюдения и в полевых и в лабораторных условиях за предметами разных угловых размеров, могут существенно различаться.

Приведем средние значения при наблюдении днем (т. е. при достаточном освещении) за объектами достаточных угловых размеров (не менее 20—30′): $\varepsilon_{пв} \approx 2\%$; $\varepsilon_{обн} \approx 5\%$; $\varepsilon_{узн} \approx 7...9\%$.

Помимо порогов контрастной чувствительности, поскольку наш глаз способен различать цвета, существуют и *пороги цветовой чувствительности* глаза. Не имея возможности останавливаться на этом подробнее, скажем только, что цветовые пороги больше яркостных. Иными словами, различия в цвете мы видим хуже, чем в яркости. Поэтому при наблюдении за удаляющимся предметом на некотором расстоянии мы перестаем различать его цветовой контраст, но еще видим предмет благодаря его различиям по яркости с окружающими предметами. В момент потери видимости предмета его дальность видимости определяется только порогом контрастной чувствительности глаза. Это справедливо и при оценке дальности видимости и более близких предметов, но в условиях пониженной или плохой видимости, например в снегопаде, сильной дымке или в тумане.

Поэтому все методы определения дальности видимости любых конкретных предметов, например посадочной дальности видимости самолетов днем, принимают во внимание только яркостный контраст. Другое дело, если речь идет о маскировке близких предметов или, наоборот, об обнаружении скрытых на местности объектов. Здесь цветовые контрасты играют большую роль.

Есть у глаза и другие пороги, связанные с восприятием огней. О них речь пойдет дальше.

Почему ночью плохо видно?

При уменьшении освещенности наблюдаемых предметов, например при смене дня сумерками и ночью, а также при уменьшении угловых размеров предметов (если их поперечник становится менее 0,5°) все пороги контрастной чувствительности глаза резко увеличиваются. Конечная их величина определяется уровнем освещения. Поэтому в безлунную ночь пороги больше, чем в лунную.

По данным Блэквелла $\varepsilon_{обн}$ в лунную ночь увеличивается до 18%, а в безлунную до 50%. Поясним, как надо понимать эти цифры. Днем, чтобы обнаружить объект, достаточно, чтобы его контраст с фоном был не менее 5%. В лунную ночь можно обнаружить только те объекты, контраст которых с фоном не менее 18%, а в безлунную ночь — только те, у которых контраст с фоном не менее 50%. При этом такие объекты будут обнаружены на крайнем пределе восприятия. Все объекты, имеющие меньшие контрасты с фоном, не видны, не различимы. Отсюда следует важный вывод: плохая видимость ночью несамосветящихся предметов обусловлена в основном свойствами нашего зрения.

При переходе ото дня к ночи свойства самих предметов и фонов, на которых мы их видим, прозрачность воздуха могут остаться такими же, однако видимость предметов резко ухудшается за счет изменения свойств нашего зрительного аппарата. Перечислим еще раз, какие характеристики зрения изменились в связи со снижением уровня освещения. Произошло переключение с колбочкового аппарата на палочковый. Зрение стало серым, однотонным. Ухудшилось качество изображения, так как палочки распо-

лагаются по периферии сетчатки, видны только контуры предметов. Уменьшилась острота зрения. Самое главное — увеличились пороги контрастной чувствительности глаза. Поэтому многие предметы стали невидимыми, а другие едва различимыми.

Метеорологическая дальность видимости

Дальность видимости любых предметов в очень большой степени определяется также состоянием прозрачности воздуха. Уменьшение прозрачности воздуха является в большинстве случаев главной причиной ограничения и потери дальности видимости любых предметов и огней. Если прозрачность воздуха большая, то дальность видимости в атмосфере хорошая. Проблема определения дальности видимости становится острой при значительном уменьшении прозрачности воздуха. Это происходит обычно и при возникновении таких метеорологических явлений, как дымка, туманы, мгла, смог, при метелях и снегопадах, дождях, песчаных или пыльных бурях.

Рассмотрим влияние прозрачности воздуха на дальность видимости.

Прозрачность воздуха в горизонтальном направлении удобно характеризовать метеорологической дальностью видимости. Метеорологической дальностью видимости $S_м$ называется дальность видимости абсолютно черного тела достаточных угловых размеров (не менее 0,5°), проектирующегося на фон безоблачного неба у горизонта днем. Метеорологическую дальность видимости, определяемую на сети метеостанций всего мира, днем можно рассчитать по формулам:

$$S_м = 3{,}91/\alpha, \tag{9.5}$$

если порог контрастной чувствительности глаза $\varepsilon_{пв} = 0{,}02$, или

$$S_м = 3{,}00/\alpha, \tag{9.6}$$

если $\varepsilon_{обн} = 0{,}05$. Здесь α — объемный коэффициент ослабления для интегрального потока световых лучей. Определение α такое же, как и приведенное выше для α_λ в формуле (1.4), только α относится не к монохроматическому, а ко всему световому потоку.

Если воздух у поверхности Земли идеально чистый и сухой, т. е. не содержит ни аэрозолей, ни водяного пара, то можно считать, что все ослабление световых потоков обусловливается только молекулярным рассеянием.

Расчеты показали, что максимально возможная метеорологическая дальность видимости (в идеально чистой и сухой атмосфере) при температуре воздуха у земной поверхности 0° С составляет 321 км. При температурах воздуха 20° С и —20° С она будет равна соответственно 344 и 297 км. Это означает, что на указанном расстоянии яркость воздушной дымки, возникающей только за счет молекулярного рассеяния в слое воздуха между глазом наблюдателя и черным предметом, видимым на фоне неба у горизонта, становится равной яркости неба у горизонта. Накладываясь на черный предмет, дымка постепенно уменьшает контраст предмета с фоном (т. е. с небом) и доводит его до порога контрастной чувствительности глаза, когда предмет становится неотличимым от фона неба, т. е. невидимым. Таким образом, в идеальной атмосфере на расстоянии в 321 км самый черный предмет становится светлым!

Любой не черный предмет имеет меньший контраст с небом у горизонта, чем черный, и, чтобы его контраст с фоном довести до порога, потребуется меньший слой воздуха. Поэтому дальность видимости других предметов всегда меньше $S_м$.

Итак, дальность видимости в атмосфере в горизонтальном направлении любых предметов не может быть больше 321 км (при 0° С). Этот предел обусловлен молекулярным рассеянием.

Постоянно присутствующие в атмосфере аэрозоли и водяной пар значительно ослабляют световые потоки и уменьшают дальность видимости всех предметов за счет рассеяния отраженного света, идущего от окружающих предметов.

Как уже говорилось в главе 2, интенсивность аэрозольного рассеяния значительно больше интенсивности молекулярного. Яркость рассеянного света при наличии аэрозоля, а значит, яркость воздушной дымки, накладывающейся на все наблюдаемые в атмосфере предметы, будет значительно больше, чем при одном молекулярном рассеянии. Поэтому аэрозольное рассеяние существенно уменьшает как метеорологическую дальность видимости, так и дальность видимости любых предметов в атмосфере.

Каков же нижний предел $S_м$? Наименьшая видимость наблюдается в туманах и облаках. В очень плотном облаке или тумане видимость может уменьшиться до нуля — тогда ничего не видно уже на расстоянии вытянутой руки. Наиболее часто в разных по интенсивности туманах и облаках $S_м$ составляет 100—300 м, но может быть и до 1 км. При видимости от 1 до 10 км говорят, что наблюдается дымка.

Значительно снижают метеорологическую дальность видимости выпадающие осадки. При изменении интенсивности дождя в Ленинградской области от слабого (0,3 мм/ч) до очень сильного (22,6 мм/ч) $S_м$ изменяется от 45,5 км до 930 м. При снегопадах $S_м$ изменяется от 900 м при слабом снегопаде (0,1 мм/ч) до 450 м при сильном (3 мм/ч). Столь сильное снижение $S_м$ в снегопадах по сравнению с дождями обусловлено большой интенсивностью рассеяния света на снежинках, размер которых в поперечнике существенно больше размера капель даже ливневых дождей.

Видимость у поверхности Земли может значительно ухудшаться при песчаных или пыльных бурях. Например, в Северной Нигерии за счет пыли, приносимой из Сахары, метеорологическая дальность видимости снижалась до 200 м и даже меньше.

В Японии песчаные бури, обусловленные выносом желтого песка из пустынь Азии, называют „коса“. Вынос песка в северную часть Тихого океана в поясе широт 25—40° с. оценивается цифрами от 2,3 до 5,6 млн. т в год! Отмечены переносы песка из пустынь Азии на еще большие расстояния, например на Гавайские острова и в Европу.

Из приведенных примеров видно, что аэрозольное рассеяние способно уменьшить метеорологическую дальность видимости от 321 км практически до нуля.

Видимость огней

Особое место в проблеме видимости занимает задача определения видимости самосветящихся предметов, угловые размеры которых меньше порога остроты зрения. Они кажутся глазу точечными источниками света. Это огни.

Днем огни плохо различимы из-за большой яркости неба и окружающих предметов. Ночью их видимость увеличивается.

Рассмотрим, какие характеристики нашего зрения определяют дальность видимости огней. Известно, что освещенность E, создаваемая огнем силы света I, убывает обратно пропорционально квадрату расстояния до огня L (см. формулу 1.1).

Световой поток от огня по пути до глаза наблюдателя будет ослабляться за счет того, что часть его рассеется, а часть поглотится. Ослабление учитывается введением в формулу (1.1) множителя $e^{-\alpha L}$, характеризующего экспоненциальный закон ослабления. Таким образом,

$$E = \frac{I}{L^2} e^{-\alpha L}, \tag{9.7}$$

где α — объемный коэффициент ослабления.

Рассмотрим два случая. Будем удаляться от огня. По мере увеличения L освещенность, создаваемая огнем, будет уменьшаться как за счет увеличения L^2 в знаменателе, так и за счет уменьшения коэффициента $e^{-\alpha L}$ в числителе. А теперь другой случай. Расстояние между огнем и наблюдателем не изменяется, но уменьшается прозрачность воздуха. Например, появилась дымка или туман, или начали выпадать осадки. Освещенность, создаваемая огнем, будет уменьшаться за счет увеличения α.

До каких пор мы будем видеть огонь в том и в другом случае? Огонь будет виден до тех пор, пока освещенность, создаваемая им на зрачке нашего глаза, не уменьшится до пороговой освещенности, на которую еще реагирует глаз. Пороговую освещенность на зрачке нашего глаза называют *порогом световой чувствительности глаза* или *порогом чувствительности глаза к точечному источнику света* ($E_{св}$).

Расстояние до огня в момент потери его видимости и будет дальностью видимости огня $S_{ог}$; так как в момент потери видимости огня $L = S_{ог}$, а $E = E_{св}$, формула (9.7) приобретает вид:

$$E_{св} = \frac{I}{S_{ог}^2} e^{-\alpha S_{ог}}. \tag{9.8}$$

Подставляя в (9.8) α из формулы (9.5) и логарифмируя, получим:

$$\ln S_{ог} + \frac{3{,}91}{2S_м} S_{ог} = \frac{1}{2}(\ln I - \ln E_{св}). \tag{9.9}$$

Эта формула и используется для определения дальности видимости огней.

Трудность применения формулы (9.9) для определения $S_{ог}$ состоит в том, что уравнение (9.9) относительно $S_{ог}$ не решается алгебраически. Для его решения построены номограммы с разными значениями порогов световой чувствительности глаза. Чем же различаются эти пороги? Пороги разные для разных типов огней и времени суток (т. е. освещенности Земли и атмосферы).

Приняты следующие значения порогов: 1) для одиночного огня в темное время суток $E_{св} = 2{,}7 \cdot 10^{-7}$ лк; 2) для групповых огней в темное время суток $E_{св} = 10^{-6}$ лк; 3) для групповых огней в светлое время суток $E_{св} = 10^{-3}$ лк. На основе этих значений $E_{св}$ построены три номограммы для определения дальности видимости различных сигнальных огней.

Определение дальности видимости огней в темную часть суток имеет большое прикладное значение. Это необходимо для обеспечения безаварийной работы авиации, железнодорожного и городского транспорта, морской и речной навигации. Особенно остро стоит проблема определения дальности видимости огней в тумане, дымке, мгле, выпадающих осадках.

Номограмма с $E_{св} = 2{,}7 \cdot 10^{-7}$ лк впервые построена В. А. Березкиным. Она используется для определения метеорологической дальности видимости ночью по видимости одиночных огней.

Номограмму с $E_{св} = 10^{-6}$ лк, построенную В. А. Гавриловым (рис. 9.1), можно использовать для определения дальности видимости групповых огней в аэропортах в темное время суток. Дальность видимости групповых огней на подходе к взлетнс-посадочной полосе и на самой полосе и есть посадочная дальность видимости ночью.

Номограмму с $E_{св} = 10^{-3}$ лк можно использовать для определения посадочной дальности видимости в аэропортах днем. Если наблюдается туман или интенсивные осадки, особенно снегопады с метелями, то в аэропортах и днем включаются все сигнальные огни на самой полосе и на подходе к ней.

Вы, возможно, уже обратили внимание, что $E_{св}$ для групповых огней в темное время суток в три раза больше, чем для одиночного огня. А ведь чем больше $E_{св}$, т. е. чем больше порог, тем меньше дальность видимости огня. Почему же групповые огни видны хуже одиночных?

Попробуем объяснить. При хорошей прозрачности воздуха дальность видимости всех сигнальных огней большая и никаких затруднений ни один

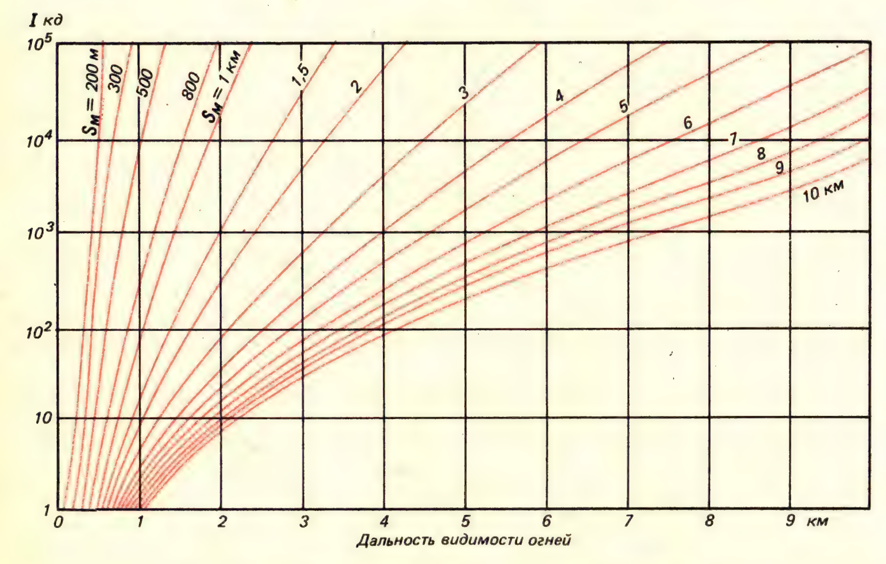


Рис. 9.1. Номограмма для определения дальности видимости групповых огней в темное время суток, для $E_{св} = 10^{-6}$ лк.

вид транспорта не испытывает. Проблема становится острей при пониженной прозрачности атмосферы. Вокруг каждого отдельного огня при тумане, осадках за счет сильного аэрозольного рассеяния на частицах тумана или осадков возникает ореол. Ореолы отдельных огней сливаются и образуют общий яркий световой фон, на котором отдельные сигнальные огни различимы хуже, чем одиночный огонь. Одиночный огонь не может создать яркого ореола, и поэтому он виден на более темном фоне и его дальность видимости больше, чем групповых огней той же силы света.

Сопоставим пороги световой чувствительности глаза к групповым огням в темное и светлое время суток. Они различаются на три порядка: ночной порог в 1000 раз меньше дневного! Это прежде всего говорит о том, что порог чувствительности глаза к точечному источнику света неустойчив. Он подвержен чрезвычайно большим колебаниям при изменении уровня освещения. Поскольку $E_{св}$ для групповых огней днем в 1000 раз больше, чем ночью, их дальность видимости днем будет много меньше, чем ночью. Групповые огни при пониженной видимости (а они только в этих случаях и включаются) очень плохо различимы днем не только из-за большой яркости рассеянного ими света (ореола), но и из-за большой освещенности и яркости небесного свода и земной поверхности.

Чтобы представить себе, насколько технически усложняется задача установки на взлетно-посадочной полосе сигнальных огней нужной силы света при плохой видимости, приведем следующие расчеты.

Для разного типа самолетов, в зависимости от скорости, на которой они осуществляют посадку, требуется обеспечить разной величины посадочную дальность видимости. Для турбовинтовых самолетов бывает достаточно 500 м, а реактивным самолетам разных конструкций требуется 1,5; 2 и 3 км. Предположим, что метеорологическая дальность видимости 1 км. Это переходное состояние от интенсивной дымки к слабому туману. Какой минимальной силы света должны быть огни на взлетно-посадочной полосе, чтобы была обеспечена их видимость (т. е. посадочная видимость) с расстояний не менее: а) 500 м, б) 1 км, в) 1,5 км, г) 3 км и д) 4 км ночью и днем. Расчеты по номограммам с $E_{св} = 10^{-6}$ лк и $E_{св} = 10^{-3}$ лк приводят к таким ответам. Ночью для обеспечения видимости этих огней с указанных расстояний достаточно, чтобы их сила света была не менее: а) 1 кд; б) 50 кд; в) 1100 кд; г) $1{,}7 \cdot 10^4$ кд; д) $>10^5$ кд. Днем для обеспечения той же самой посадочной дальности видимости требуется установить огни значительно большей силы света: а) ≈ 2100 кд; б) $\approx 5 \cdot 10^4$ кд; в) $\approx 7 \cdot 10^5$ кд; г) $>10^7$ кд; д) $> 10^7$ кд. При этом огни такой силы света видны на пороге восприятия. Чтобы увидеть их уверенно, надо еще увеличить их силу света.

Законы видимости „диктует“ глаз

Из изложенного в данной главе следует, что исходные зависимости, положенные в основу теории дальности видимости в атмосфере любых объектов, „продиктованы“ нашим органом зрения. При решении конкретных задач определения дальности видимости различных предметов и сигнальных огней при разных уровнях освещения (т. е. в разное время суток) надо хорошо представлять себе особенности работы нашего зрительного аппарата. Недооценка роли световых и яркостных порогов глаза может привести к серьезным ошибкам.

При определении дальности видимости конкретных объектов, например взлетно-посадочной полосы в аэропортах, судов в море, построек или других сооружений на берегу, высотных зданий и т. п., помимо рассмотренного нами влияния пороговых характеристик глаза и прозрачности атмосферы, необходимо учитывать влияние свойств самих наблюдаемых предметов (их размеров, цвета, яркости, состояния поверхности), свойств фонов, на которые предметы проектируются (их яркости и цвета), и условий освещения. Изложение этой проблемы выходит за рамки данной книги.

Какова сегодня видимость?

Во время Великой Отечественной войны мне, тогда только начинающему специалисту, довелось работать в Главной геофизической обсерватории в „группе видимости", как ее тогда называли. Группой руководил один из основоположников учения о видимости замечательный ученый и человек профессор Владимир Александрович Березкин. К нему часто обращались с вопросом: „Какова сегодня видимость?" И он неизменно с улыбкой отвечал: „А что вам надо увидеть?" Думается, что сказанное выше о видимости свидетельствует, насколько верен и остроумен был ответ проф. Березкина.

Зрение в космосе

Велика роль зрения человека в наземных условиях, но еще больше она возрастает в космическом полете. В условиях невесомости уменьшается информация от вестибулярного аппарата и зрение помогает ориентироваться в пространстве. Считают, что в космосе человек получает через свой „зрительный канал" примерно 95% информации от внешнего мира! Поэтому важно исследовать основные пороги и характеристики глаза в условиях космоса.

Исследование функций зрения космонавтов проводилось с помощью специальных приборов и тестов на Земле и на разных этапах полета. Судить об изменениях зрения можно и по результатам визуальных наблюдений космонавтов в полете.

Основной вывод из этих исследований — зрительные функции космонавтов в полете достаточно надежны, как и на Земле, и визуальные наблюдения можно использовать для исследования оптических явлений. Вместе с тем отмечаются некоторые изменения пороговых характеристик, особенно при взлете и на первых витках полета.

Острота зрения у большинства космонавтов практически не изменяется. Небольшое снижение, не более 5—10%, наблюдалось, но это почти в пределах погрешности самого метода. У одного из космонавтов, наоборот, острота зрения повысилась на 20%.

Оперативная зрительная работоспособность снижается мало, в среднем на 10%, но есть и здесь индивидуальные различия.

Контрастная чувствительность зрения уменьшается на 16%. В изменении цветовой чувствительности в восприятии разных цветов отдельными космонавтами отмечены большие индивидуальные колебания. Среднее снижение цветовой чувствительности — около 25%.

Повторим еще раз, что указанное снижение функций не столь велико, если учесть, что и примененные методы оценок обладают известными погрешностями. Поэтому визуальные наблюдения из космоса представляют большую ценность.

На качество визуальных наблюдений из космоса существенное влияние оказывают иллюминаторы. Иллюминаторы — это окна с двух- или трехслойными стеклами. В хорошем состоянии они рассеивают не более 1—5% падающего на них света. Но при длительной работе станции часть иллюминаторов загрязняется, обмерзает, запотевает и не пригодна для наблюдений.

Другая трудность заключается в том, что иллюминаторы подсвечиваются внешними источниками: Луной, отраженным от Земли светом, Солнцем. Яркость подсветки может быть разной в зависимости от ориентации иллюминатора относительно этих источников. Подсветка затрудняет и делает невозможным наблюдение через незащищенные иллюминаторы таких слабых излучений, как, например, зодиакальный свет и серебристые облака.

Результаты наблюдений из космоса ночного и сумеречного свечений атмосферы, серебристых облаков и зодиакального света изложены ниже в главах и параграфах, носящих соответствующие названия. Основные исследования перечисленных световых явлений проводились с помощью приборов, позволяющих измерять спектральный состав, распределение энергии, поляризацию и другие характеристики исследуемых излучений. Главные перспективы и в будущем, без сомнения, связаны с применением автоматической аппаратуры и сложных приборов, требующих участия человека. Однако и визуальные наблюдения из космоса принесли и продолжают приносить богатую информацию. У визуальных наблюдений есть свои достоинства.

Преимущество визуальных наблюдений

Подчеркнем особенность визуального наблюдения в сравнении с фотографированием и получением телевизионных изображений. При хорошем освещении (днем) и достаточных угловых размерах наблюдаемых предметов (не менее 20—30′) порог контрастной чувствительности глаза человека, как уже говорилось, равен 2%, а иногда даже 1%, пороги контрастной чувствительности (т. е. минимально разрешаемые яркостные контрасты) фотографического и телевизионного изображений равны соответственно 10—15 и 15—25%. Поскольку атмосфера вносит свою „лепту“ в уменьшение имеющихся контрастов, особенно между облаками и поверхностью Земли, минимальные значения контрастов, необходимые для того, чтобы уверенно различать детали на поверхности Земли, должны быть для визуальных наблюдений, фотографирования и телевизионных изображений по крайней мере удвоены, т. е. должны быть не менее 4, 30 и 50% соответственно. Представляете, насколько глаз человека лучше различает особенности, детали наблюдаемых предметов по сравнению с фотографией и телевизионным изображением! Глазом можно увидеть то, что недоступно пока ни фотографии, ни телевизионному изображению.

По утверждению всех космонавтов, визуальная картина земной поверхности из космоса существенно отличается от фотографий и телевизионных изображений, прежде всего своей четкостью. На фотографиях поверхности

Земли, облачных покровов всегда присутствует вуаль или „сеточка“, что отчасти объясняется засветкой жестким излучением, имеющимся в космосе. На телевизионное изображение ослабляющее влияние оказывает, в частности, атмосфера, через которую оно должно пройти.

Все космонавты легко узнавали материки и океаны по их характерным очертаниям. На океанах видели движение волн, зыбь, в пустынях — песчаные дюны. Улавливали различие в прозрачности атмосферы над отдельными районами земной поверхности, формы облаков, циклоны, грозы и многие другие особенности суши, океана и атмосферы. С высоты полета станции 250—300 км при наблюдении вниз хорошо различимы объекты размером 1—2 км, а иногда и меньше, порядка 500 м.

Остановимся на двух открытиях, сделанных при наблюдении земной поверхности из космоса. Эти явления можно увидеть пока только визуально.

Поверхность океана со „сводами“ и „ложбинами“

В программу наблюдений орбитальной станции „Салют-6“ входили визуальные наблюдения и фотографирование океанов. Каково же было удивление самих космонавтов и специалистов, принимавших сообщения на Земле, когда В. В. Коваленок 4 октября 1978 г., а затем и другие космонавты обнаружили, что в океанах есть области „сводов“ — участки с повышенным уровнем воды и области „ложбин“ — участки с пониженным на несколько метров уровнем воды. Диаметры таких областей составляют порядка 200—300 км. Вокруг „сводов“ наблюдалась характерная картина движения облаков (рис. 9.2). Это имело место в Атлантическом и Тихом океанах.

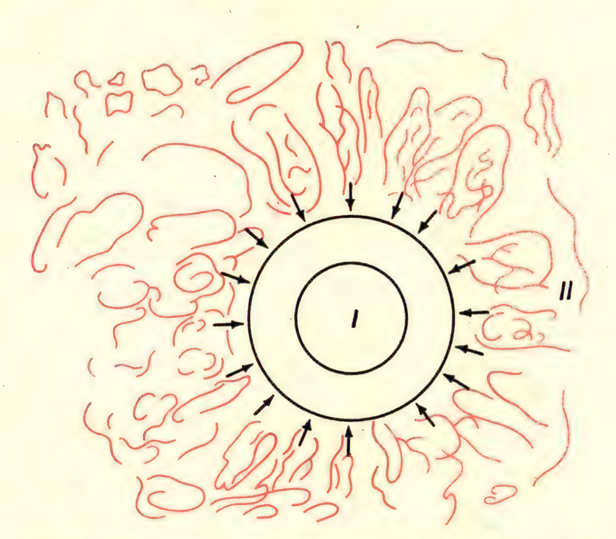


Рис. 9.2. Участки пониженного уровня океана (I) и характерная картина движения облачного покрова (II).

В Атлантическом океане „своды“ видели неоднократно в районе Бермудского треугольника, в Тихом — в районе к западу от Калифорнии и к северо-востоку от Новой Зеландии.

Аналогичные изменения уровня воды в океане наблюдали и американские космонавты с космической станции „Скайлэб“. „Провалы“ и „воронки“ были обнаружены ими в том же знаменитом „роковом“ Бермудском треугольнике. Радиовысотомером космонавты уточнили, что снижение уровня океана происходит в соответствии с понижением дна океана в районе о. Пуэрто-Рико. Возможно, что „действующей силой“ в создании „воронок“, или „ложбин“, является сила тяжести, под влиянием которой и искривляется поверхность океана.

Наблюдаемые „валы“, или „своды“, и „ложбины“ имеют совсем малую крутизну — порядка 10 м на 100 км расстояния. Увидеть их с самолета или с судна в море невозможно, так как они не умещаются в площадь обзора. Это доступно только с высоты полета космических кораблей.

Вижу подводный горный хребет!

Еще более удивительным и просто невероятным показалось сообщение космонавтов В. Ляхова и В. Рюмина о том, что они увидели подводный горный хребет юго-западнее Гавайских островов. Проверив по картам, убедились, что в этом месте океана действительно есть горный хребет, но он на глубине несколько сотен метров. Как его можно было увидеть, если слой воды уже около 100 м совершенно непрозрачен? Это пока неразгаданная тайна. Убедительного физического объяснения такой сверхпрозрачности воды в океане пока нет, но есть гипотезы.

Обнаруживали подводные хребты с советских пилотируемых космических кораблей и раньше. Первыми их увидели космонавты Л. С. Демин и Г. В. Сарафанов в августе 1974 г. Позднее в 1975 г. П. И. Климук и В. И. Севастьянов с орбитальной станции „Салют-4“ обнаружили Срединно-Атлантический подводный хребет, В. В. Коваленок и А. С. Иванченков в июне 1978 г.— подводный хребет в районе Соломоновых островов.

Как можно увидеть то, что не должно увидеть?

Выскажем, вслед за самими космонавтами, соображения самого общего характера о том, как же можно увидеть из космоса то, что по сложившимся физическим представлениям нельзя увидеть.

Соображение первое. При наблюдении с космического корабля через иллюминатор экранируется значительная часть фона, т. е. поверхности океана, окружающей исследуемый участок. Тем самым убирается излишне большая яркость фона, особенно в пригоризонтных областях. Возможно, что при этом повышается контрастная чувствительность глаза (уменьшается порог!).

Соображение второе. Большая площадь обзора с высоты космического полета позволяет видеть всю область „свода“ или „ложбины“. Например, при высоте корабля в перигее 250 км, а в апогее 400 км геометрическая дальность видимости или радиусы площади обзора составляют 1900

и 2400 км. В действительности видимая площадь земной поверхности существенно меньше, так как из-за сильной дымки, обусловленной рассеянием света, не видны области поверхности Земли, близкие к горизонту. Тем не менее космонавт видит через иллюминатор сразу весь участок повышенного или пониженного уровня на фоне окружающего, хотя и „обрезанного“, океана. Для сравнения заметим, что геометрическая дальность видимости с самолета, летящего на высоте 10 км, составляет около 320 км теоретически, а в действительности меньше, не более 100 км, так как горизонт затянут дымкой. Поэтому с самолета нельзя увидеть весь участок „свода“ или „ложбины“ океана с окружающим его фоном.

Соображение третье. Благодаря чему, или за счет чего космонавт видит „валы“ и „ложбины“ в океане, а также и подводные хребты? Эти образования при определенном, благоприятном освещении имеют, пусть небольшие, различия в яркости с окружающим фоном, т. е. возникает яркостный контраст. Под благоприятным освещением подразумевается совмещение наиболее выгодных высот Солнца (при которых не возникает бликов на иллюминаторе), углов рассеяния и наблюдения. Проявлению этого контраста способствует еще одна особенность наблюдений из космоса — *территориальная интеграция*, как говорят космонавты. Она заключается в сглаживании частностей, деталей, что способствует выявлению осредненных по большой площади яркостных характеристик, т. е. выявлению яркостного контраста.

Мы уделили внимание этим открытиям, сделанным из космоса, для того, чтобы еще раз продемонстрировать необыкновенно высокую контрастную чувствительность зрения человека. Благодаря ей и были сделаны эти открытия. Наблюдения „сводов“, „ложбин“, подводных горных цепей лежат на пределе или на уровне порога контрастной чувствительности глаза, а поэтому они не доступны пока ни фотографированию, ни телевизионным изображениям.

РЕФРАКЦИЯ СВЕТА В АТМОСФЕРЕ

10. Преломление световых лучей при прохождении атмосферы

Эксперимент никогда не обманывает,
обманывают наши сужденья.

Леонардо да Винчи

Что такое рефракция?

Время восхода и захода Солнца в любом месте земного шара в любой день года рассчитывается по астрономическим формулам достаточно точно. Эти сведения публикуются в астрономических справочниках и даже в обыкновенных календарях и местных газетах. А пробовали ли вы проверить по часам, действительно ли день начинается и заканчивается в те часы и минуты, которые указаны в календаре? Если проверите, то убедитесь: рассчитанное время восхода и захода и действительное далеко не всегда совпадают. В чем же причина этого? Может быть, астрономические формулы не очень точны? Нет, формулы достаточно точны. Дело в том, что свои „коррективы" вносит атмосфера, окружающая Землю. Если бы ее не было, то прогноз времени восхода и захода любого светила всегда оправдывался бы с большой точностью.

Плотность воздуха в атмосфере быстро уменьшается с высотой. Вместе с плотностью изменяется показатель преломления n и скорость распространения электромагнитных волн в атмосфере v. Как известно, $n = c/v$, где c — скорость распространения электромагнитных волн в пустоте. Показатель преломления воздуха очень близок к единице. Например, для красных лучей он равен 1,000 275, для фиолетовых 1,000 283. Поэтому при расчетах удобнее пользоваться величиной $(n - 1)$, называемой индексом рефракции.

Индекс рефракции пропорционален плотности воздуха ρ, а так как из уравнения состояния любого газа $\rho = \frac{p}{RT}$, то

$$\frac{n-1}{n_0-1} = \frac{\rho}{\rho_0} = \frac{pT_0}{p_0T}, \qquad (10.1)$$

Здесь n_0, ρ_0, p_0 и T_0 — соответственно показатель преломления, плотность, давление и температура воздуха у поверхности Земли, R — удельная газовая постоянная.

Если электромагнитная волна проходит в атмосфере достаточно большой путь, вдоль которого изменяются температура воздуха T и его давление p, волна будет преломляться.

Рефракцией называется преломление электромагнитных волн в атмосфере в силу неоднородности плотности воздуха, как в горизонтальном, так и, особенно сильно, в вертикальном направлениях. Траектории электромагнитных волн в атмосфере представляют собой сложного вида кривые.

Помимо температуры и давления индекс рефракции зависит от длины волны λ. Одновременная зависимость $(n-1)$ от трех параметров (p, T и λ) выражается эмпирической формулой, справедливой для электромагнитных волн широкого диапазона, примерно от 0,20 до 20 мкм:

$$(n-1)=\left(\frac{77{,}6p}{T}+\frac{0{,}584p}{T\lambda^2}\right)\cdot 10^{-6}. \qquad (10.2)$$

В этот диапазон входят ультрафиолетовые, световые и инфракрасные волны. В дальнейшем для краткости будем употреблять термин световые лучи, так как именно световые электромагнитные волны обусловливают многочисленные оптические явления, возникающие в результате рефракции.

Из формулы (10.2) следует, что чем короче длина волны, тем сильнее она преломляется, т. е. тем более сильную рефракцию она испытывает. Например, фиолетовые лучи (0,40 мкм) сильнее преломляются, чем зеленые (0,55 мкм), а зеленые — сильнее, чем красные (0,76 мкм). При длительном пути светового луча в атмосфере, белый луч за счет рефракции разлагается в спектр. Этой зависимостью рефракции от длины волны мы неоднократно воспользуемся в дальнейшем для объяснения многочисленных световых явлений, порождаемых ею.

Астрономическая рефракция

Световой луч S поступает на границу атмосферы от источника, находящегося за ее пределами (рис. 10.1). Разобьем атмосферу на несколько концентрических слоев, достаточно тонких, чтобы внутри каждого из них показатель преломления n можно было считать постоянным. Обозначим слои

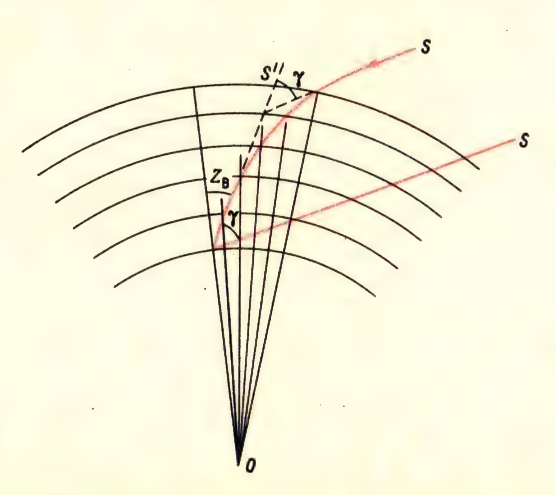


Рис. 10.1. Астрономическая рефракция.

I, II, III и т. д., а соответствующие им показатели преломления n, n_2, n_3 и т. д. Плотность воздуха в направлении к Земле возрастает, поэтому $n_1 < n_2 < n_3 < ...$

Световой луч на границе каждых двух слоев будет преломляться, постепенно приближаясь к перпендикуляру. Траектория луча искривляется и при нормальном распределении плотности оказывается обращенной к земной поверхности своей вогнутой стороной. Так как мы видим любой источник света по направлению касательной к последнему участку траектории луча, то нам будет казаться, что источник S находится выше, чем он есть в действительности, на угол γ, называемый *углом астрономической рефракции*. Рефракция называется астрономической, если источник света находится за пределами атмосферы. Чем более длинный путь в атмосфере проходят лучи, тем более сильную рефракцию они испытывают. Наиболее длинный путь в атмосфере лучи проходят при положении светила у горизонта, т. е. в моменты близкие к его восходу или заходу. В это время оптическая масса атмосферы, проходимая лучами, в 35 раз больше, чем оптическая масса, проходимая лучами при вертикальном их падении на атмосферу.

При нормальном состоянии атмосферы, т. е. таком состоянии, когда атмосферное давление составляет 1000 гПа, температура воздуха 0° С, а ускорение свободного падения соответствует ускорению свободного падения на широте 45° и уровне моря, угол рефракции составляет немногим более полуградуса, примерно 35′. По мере увеличения высоты светила угол рефракции очень быстро уменьшается и становится равным нулю, когда светило находится в зените. Таким образом, за счет рефракции высота всех светил, наблюдаемых на небосводе — Солнца, Луны, созвездий, планет и т. д., увеличивается на угол γ, и γ тем больше, чем ближе к горизонту находится светило.

Поскольку рефракция влияет на положение светил на небосводе, в точном определении угла астрономической рефракции заинтересованы астрономы, водители судов и т. д.

Для видимых зенитных расстояний светил $Z_в$ меньше 60° угол γ в угловых секундах с точностью до 1″ можно вычислить по формуле:

$$\gamma = (16{,}09p/T)\,\mathrm{tg} Z_в\,. \qquad (10.3)$$

Как видно из формулы (10.3), угол рефракции, помимо высоты светила, зависит еще от температуры и давления воздуха у поверхности Земли. В зимнее время в полярных районах земного шара, где температуры бывают особенно низкими, угол рефракции может быть в несколько раз больше обычного. Например, Г. А. Тихов наблюдал в Пулкове зимою угол рефракции 2°01′, Ф. Нансен в Арктике —2°22′, В. Баренц на Новой Земле — 4—5°.

В мореходной практике для определения координат судна в океане расчеты γ выполняются более точным методом.

Удлинение дня

Прямым следствием рефракции солнечных лучей является увеличение продолжительности дня. При заходе Солнца, когда его диск уже опустился под горизонт, рефракция его приподнимает, и день еще продолжается. Аналогично при восходе: Солнце еще находится под горизонтом, а за счет

7 Зак. 809

рефракции мы его уже видим, т. е. день начинается раньше действительного восхода Солнца.

Увеличение продолжительности дня определяется не только величиной угла рефракции, но зависит еще от широты места и склонения Солнца в данный день. В средних широтах (Москва, Ленинград) за счет рефракции день увеличивается обычно не более чем на 8—12 мин. Если мы будем перемещаться по земной поверхности по направлению к полюсам, то удлинение дня становится все более и более значительным. Например, даже при среднем значении угла астрономической рефракции (35′) увеличение продолжительности дня в день весеннего или осеннего равноденствия достигает на широте 88° 2 ч 18 мин, на широте 89° 5 ч 42 мин, на широте 89°08′ 8 ч 06 мин. При больших значениях угла рефракции, какие часто наблюдаются в полярных районах зимой, увеличение дня может быть значительно больше, а полярный день увеличивается даже на несколько дней. На полюсах земного шара, где полярный день и полярная ночь должны продолжаться ровно по полгода, оказывается, что полярный день длиннее полярной ночи на 14 суток!

„Эффект Новой Земли“

Впервые это явление было описано В. Баренцом. Экспедиция Баренца, искавшая северо-восточный проход вокруг Европы, вынуждена была зазимовать на Новой Земле. Это была зима 1596-97 г. После полярной ночи Солнце впервые появилось над горизонтом, когда по астрономическим расчетам его глубина под горизонтом была 4,9°. Полярная ночь кончилась на несколько дней раньше. За этим явлением с „легкой руки“ Баренца и закрепилось название „эффект Новой Земли“. Во всяком случае в иностранной метеорологической литературе до сих пор явление описывается под таким названием.

Следует сказать, что сообщения самого Баренца об этом эффекте и попытка Кеплера объяснить его в 1604 г. были встречены тогда с известным недоверием.

Аналогичные явления позднее многократно наблюдались и в других местах Арктики и Антарктики. Э. Шеклтон во время антарктической экспедиции 1914—1917 гг. наблюдал эффект Новой Земли 8 мая и 26 июля 1915 г. при глубинах погружения Солнца 2°37′ и 2° соответственно.

Такая прибавка светлого времени за счет рефракции и в сутках и за весь год весьма ощутима как для человека, так и для животного и растительного мира этих районов.

Интересные исследования эффекта Новой Земли были выполнены недавно В. Леном (1979 г.). Анализируя метеорологические условия, он показал, что это явление возникает при наличии сильной температурной инверсии (т. е. повышении температуры воздуха с высотой в некотором слое атмосферы) у поверхности Земли с перепадом температур до 25° С, когда инверсия простирается до высоты порядка 1000 м. Автор провел расчеты траекторий световых лучей при различных вертикальных градиентах температуры*

* Вертикальным градиентом температуры называется изменение температуры с высотой на единицу расстояния по вертикали, взятое с обратным знаком: $\gamma = -\partial T/\partial Z$.

в приземном слое. Оказалось, что возможны два варианта траекторий солнечных лучей.

Первый. Рефракция лучей очень сильная, но неравномерная. На некоторой высоте лежит слой с очень сильной рефракцией (холодный слой), а выше и ниже его слои со слабой рефракцией (более теплые). У самой поверхности Земли лежит снова холодный слой. Холодный слой на высоте, зажатый между теплыми слоями, называется *термоклином*. Он должен иметь большую горизонтальную протяженность. Солнечные лучи, попав в термоклин и многократно отражаясь от выше- и нижележащих теплых слоев, могут распространяться вдоль термоклина на очень большие расстояния, до 400 км и более.

Этот вариант можно назвать случаем с термоклином на высоте.

Второй. Очень холодный приземный слой воздуха, а выше резкая температурная инверсия. Роль термоклина играет холодный приземный слой. Попавшие в термоклин солнечные лучи будут многократно отражаться от слоя инверсии выше термоклина и от земной поверхности и также уходить по термоклину на большие расстояния. Покидая этот слой, лучи будут создавать искаженные и сложные изображения Солнца. Это случай термоклина у поверхности Земли.

Необычайно сильной рефракцией, но при неустойчивом состоянии атмосферы, можно объяснить явление, которое наблюдалось 20 января 1974 г. в поселке Черский в Якутии: во время полярной ночи Солнце неожиданно показалось над горизонтом на несколько минут. Настоящий восход Солнца (т. е. конец полярной ночи) произошел только через несколько дней.

Искажения диска Солнца при восходе и заходе

За счет рефракции солнечных лучей при восходе и заходе возникает еще несколько оптических явлений. Прежде всего при восходе и заходе искажается форма солнечного диска. Круглый обычно диск Солнца при приближении к горизонту сплющивается в вертикальном направлении, принимая форму яйца с горизонтальной длинной осью (рис. 10.2). По образному выражению Э. Л. Подольской, „...диск его смешно приплюснут, /Как будто на щеках два флюса". Объясняется сплющивание Солнца тем, что нижний его край, касаясь горизонта, испытывает более сильную рефракцию, чем верхний, который находится на высоте 32′ над горизонтом, поскольку угловой диаметр Солнца 32′. При нормальном состоянии атмосферы нижний край приподнимается за счет рефракции на 35′, а верхний только на 28′. В результате солнечный диск оказывается сплющенным на 7′. При более низких температурах у поверхности Земли, например в условиях зимних



Рис. 10.2. Сплющивание диска Солнца и Луны у горизонта.

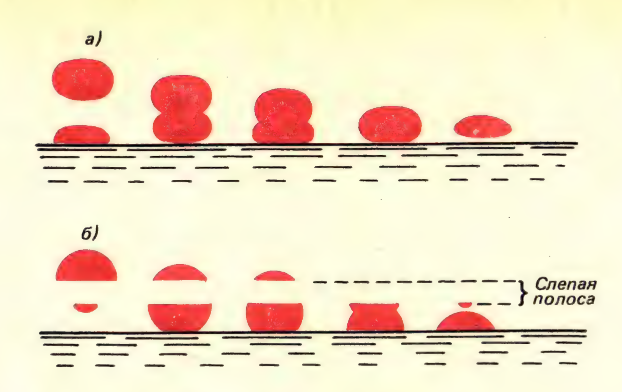


Рис. 10.3. Искажение диска Солнца при заходе.

антициклонов в Сибири или в полярных районах земного шара, угол рефракции увеличивается и сплющивание солнечного диска может быть более сильным. В связи с этим сложилась народная примета: Солнце с „ушами“ — к морозу. Действительно, сильное сплющивание диска наблюдается при установлении сильных морозов. Лунный диск также сплющивается аналогично солнечному.

Если плотность воздуха уменьшается с высотой неравномерно, искажения формы солнечного диска могут быть самыми разнообразными, например и такими, какие изображены на рис. 10.3. Формы солнечного диска, показанные на рис. 10.3 *а*, наблюдаются при небольшой по высоте, но очень сильной приземной инверсии температуры; а показанные на рис. 10.3 *б* — при инверсии температуры на некоторой высоте над земной поверхностью.

Рефракция может настолько исказить диск Солнца перед его заходом или сразу после восхода, что он по форме скорее напоминает греческую букву Ω, чем круг. Таким, например, его видели в августе 1983 г. в Нидерландах.

Зеленый луч

Рефракция солнечных лучей в атмосфере, как мы уже говорили, сопровождается их дисперсией, т. е. разложением в спектр. Чем меньше длина волны луча, тем более сильную рефракцию он испытывает. Поэтому чем короче длина волны луча, тем сильнее он будет приподниматься за счет рефракции. В результате наложения друг на друга цветовых лучей от отдельных точек солнечного диска центральная часть его останется белой (а точнее, за счет рассеяния весь диск становится красным) и только верхняя и нижняя каемки диска оказываются в преимущественном положении. Верхняя становится сине-зеленой, нижняя — оранжево-красной. Красная и оранжевая части диска Солнца заходят за горизонт раньше зеленой и голубой (рис. 10.4).

Дисперсия солнечных лучей в наиболее явном виде проявляется в самый последний момент захода Солнца, когда над горизонтом остается небольшой

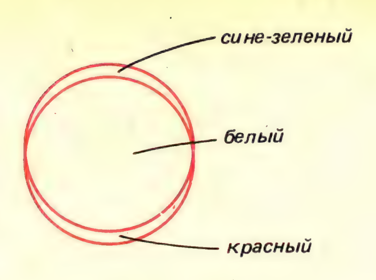


Рис. 10.4. К объяснению зеленого луча.

верхний сегмент, а затем только самая „макушка" солнечного диска. Последний луч заходящего Солнца, разлагаясь в спектр, образует „веер" цветных лучей (рис. 10.5). Расхождение крайних лучей видимого спектра — фиолетовых и красных составляет в среднем 38″, но при более сильной рефракции оно может быть и значительно больше. Когда Солнце погружается под горизонт, последним лучом мы должны были бы увидеть фиолетовый. Однако самые коротковолновые лучи — фиолетовые, синие, голубые — на долгом пути в атмосфере (когда Солнце уже у горизонта), настолько сильно рассеиваются, что не доходят до земной поверхности. Кроме того, к лучам этой части спектра меньше чувствительность глаза человека. Поэтому в последний момент захода происходит быстрая смена цветов от красного через оранжевый и желтый к зеленому и последний луч заходящего Солнца оказывается яркого изумрудного цвета. Это явление и получило название зеленого луча.

При восходе Солнца имеет место обратная смена цветов. Первый луч восходящего Солнца — зеленый сменяется желтым, оранжевым и, наконец, из-за горизонта показывается красный край восходящего светила. Явление зеленого луча бывает трех форм: в виде зеленого края верхней части диска Солнца, в виде зеленого сегмента и в виде зеленого луча, который похож на зеленое пламя, вырывающееся из-за горизонта. При исключительно высокой прозрачности воздуха последний луч может быть зелено-голубым и даже голубым. Но это случается очень редко.

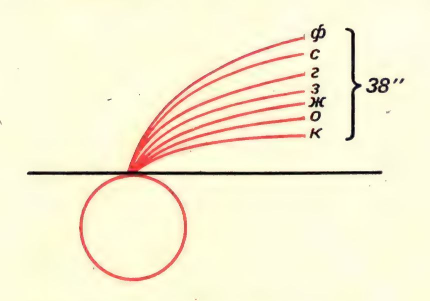


Рис. 10.5. Возникновение зеленого луча.

Раньше считали, что зеленый луч исключительно редкое явление. В связи с этим в Шотландии даже существует такая примета: каждый, кто хоть однажды увидел зеленый луч, никогда не совершит ошибки в сердечных делах. Не будем всерьез думать, что наблюдение зеленого луча может застраховать кого-либо от жизненных ошибок, но настоятельно рекомендуем постараться увидеть это красочное явление природы.

Появляется зеленый луч совсем не так редко. Для его наблюдения необходимы три условия: открытый горизонт (в степи или на море в отсутствие волнения), чистый воздух и свободная от облаков сторона горизонта, где происходит заход или восход Солнца.

Обычная продолжительность зеленого луча всего несколько секунд. Можно значительно увеличить время его наблюдения, если при его появлении быстро взбегать по насыпи или переходить с одной палубы судна на другую с такой скоростью, чтобы сохранить положение глаза относительно зеленого луча. Во время одной из экспедиций к Южному полюсу американский летчик и исследователь Р. Бэрд наблюдал зеленый луч в течение 35 минут! Это произошло в конце полярной ночи, когда край солнечного диска в первый раз появился над горизонтом и передвигался вдоль него.

Новое о зеленом луче. Мы рассматривали явления астрономической рефракции в предположении, что земная атмосфера является плоскопараллельной или сферически симметричной, т. е. считали, что плотность воздуха и показатель преломления изменяются только по вертикали. Исследования последних лет показали, что для возникновения зеленого луча этого недостаточно. Зеленый луч может наблюдаться только в том случае, если показатель преломления изменяется также и в горизонтальном направлении, например с востока на запад вдоль кривой, имеющей волнообразный характер. Зеленый луч, прежде чем мы его увидим, скользит некоторое время в воздушном слое, концентрическом с земной поверхностью.

Всех видевших зеленый луч поражает его необыкновенный изумрудный тон. Возможно, что необычайная чистота зеленого тона и натолкнула специалиста по голографии и лазерам Вильяма Кона на мысль искать объяснение зеленого луча в излучении возбужденных атомов кислорода при переходе их из метастабильного состояния в нормальное, сопровождающемся излучением зеленого света с длиной волны 0,5585 мкм. Однако механизм возникновения такого природного лазера пока еще не раскрыт.

Мерцание звезд

Рефракцией света обусловлено и наблюдаемое мерцание звезд. Если посмотреть на яркую звезду, например Сириус, в телескоп, то легко заметить ее слабое дрожание. Даже простым глазом видно, что звезда, особенно когда она находится близко к горизонту, изменяет и свою яркость и свой цвет. Кажется, что звезда то вспыхивает, то угасает, то ее цвет становится более красноватым, то более зеленоватым. Объясняется мерцание звезд преломлением и частичной дисперсией лучей, идущих от звезды, в струях то теплого, то холодного воздуха, постоянно встречающихся на пути ее лучей в атмосфере.

В отличие от звезд, планеты не мерцают или слабо мерцают только вблизи горизонта. Это объясняется тем, что планеты мы видим в форме маленьких дисков, а не точек, как звезды. Отдельные точки планеты мерцают, но беспорядочные дрожания отдельных точек гасят друг друга. Общее мерцание получается слабым.

Явление, аналогичное мерцанию, в виде дрожания контуров далеких гор, краев солнечного или лунного дисков мы видим при наблюдении в подзорную трубу или бинокль.

Земная рефракция

Лучи от наземных предметов, если они проходят в атмосфере достаточно большой путь, также испытывают рефракцию. Траектория их под влиянием рефракции искривляется, и мы видим их не на тех местах или не в том направлении, где они в действительности находятся.

С земной рефракцией постоянно сталкиваются геодезисты. При визировании летом горы из долины гора кажется выше, чем она есть, и, наоборот, при визировании долины с горы долина кажется приподнятой (рис. 10.6).

Углом земной рефракции α называется угол между направлением на видимое и действительное положение наблюдаемого предмета. Значение угла α зависит от расстояния до наблюдаемого предмета и от вертикального градиента температуры в приземном слое* атмосферы, в котором происходит распространение лучей от наземных предметов.

Как далеко до горизонта?

Когда вы находитесь на открытой местности, скажем, в степи или в море, то при ясной погоде и хорошей прозрачности воздуха отчетливо видите линию горизонта, ту самую линию, вдоль которой небо соединяется с Землей. Задумывались ли вы когда-нибудь над вопросом: а как далеко до

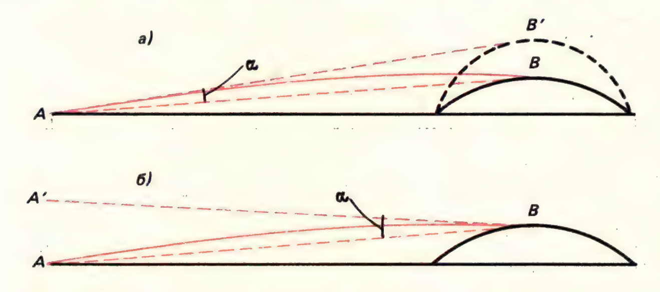
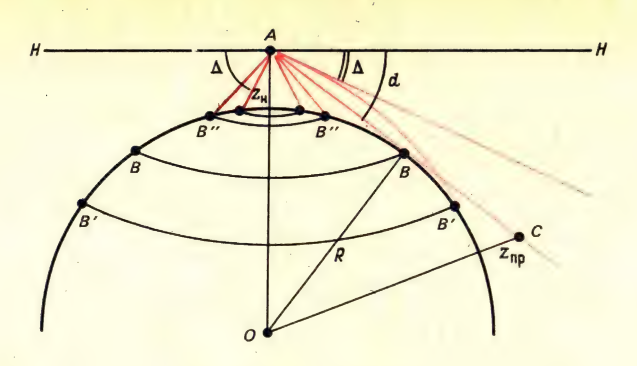


Рис. 10.6. Проявление земной рефракции при визировании: *а* — горы из долины, *б* — долины с горы, α — угол земной рефракции.

---

* Приземным слоем называется нижняя, прилегающая к земной поверхности часть атмосферы до высоты 50—100 м, в отдельных случаях до 200—250 м.



10.7. Земная рефракция.
HH — математический горизонт, AB — геодезический (геометрический) горизонт.

горизонта? Чем измеряется это расстояние — метрами, километрами или сотнями километров? Для ответа на этот вопрос решим маленькую геометрическую задачу с помощью рис. 10.7.

Наблюдатель находится в точке A, на некоторой высоте $z_н$ над земной поверхностью и смотрит на горизонт в направлении точки B. HAH — горизонтальная плоскость, проходящая через точку A перпендикулярно радиусу земного шара. Ее называют плоскостью математического горизонта. Если бы лучи света распространялись в атмосфере прямолинейно, то самая далекая точка на Земле, которую может увидеть наблюдатель из точки A, была бы точка B. Расстояние до этой точки (касательная AB к земному шару) и есть *геодезическая* (или *геометрическая*) *дальность видимости* D_0. BB — круговая линия на земной поверхности — наш геодезический (или геометрический) горизонт. Величина D_0 обусловлена только геометрическими параметрами: радиусом Земли R и высотой наблюдателя $z_н$. Из рис. 10.7 видно, что

$$D_0 = \sqrt{2Rz_н}.$$

Считая, что $R = 6378$ км, получаем:

$$D_0 = 3{,}57\sqrt{z_н}. \tag{10.4}$$

В формуле (10.4) $z_н$ — представляется в метрах, D_0 — получаем в километрах.

Если наблюдатель смотрит не на точку B, находящуюся на Земле, а на некоторый предмет, имеющий высоту $z_{пр}$, например на точку C, геодезическая дальность видимости этого предмета будет равна:

$$D_0 = 3{,}57(\sqrt{z_н} + \sqrt{z_{пр}}). \tag{10.5}$$

где, как и в (10.4), $z_н$ и $z_{пр}$ — в метрах, а D_0 — в километрах.

Эти формулы были бы верны, если бы свет распространялся в атмосфере прямолинейно. Но мы уже знаем, что это не так. При нормальном распределении температуры и плотности воздуха в приземном слое кривая линия,

изображающая траекторию светового луча, обращена к Земле своей вогнутой стороной. Поэтому самая далекая точка, которую увидит наблюдатель из A, будет не B, а B'.

Геодезическая дальность видимости AB' с учетом рефракции будет в среднем на 6—7% больше. Поэтому в формулах (10.4) и (10.5) перед корнем будет стоять коэффициент не 3,57, а 3,82. Таким образом,

$$D = 3{,}82\sqrt{z_{\text{н}}}, \qquad (10.6)$$

$$D = 3{,}82(\sqrt{z_{\text{н}}} + \sqrt{z_{\text{пр}}}). \qquad (10.7)$$

Теперь вернемся к вопросу, заданному в начале параграфа: каково расстояние до горизонта? Пользуясь формулой (10.6), каждый может вычислить дальность горизонта на Земле для своего роста. Для человека среднего роста линия горизонта лежит на расстоянии около 5 км. Для этого же человека на Луне (без учета рефракции!) дальность горизонта будет только 3,3 км, а вот на Сатурне —14,4 км.

Для космонавтов В. А. Шаталова и А. С. Елисеева, летавших на космическом корабле „Союз-8", дальность горизонта была в перигее (высота 205 км) —1730 км, а в апогее (высота 223 км) —1800 км.

Какой горизонт дальше?

Для световых лучей или для радиоволн? То есть при наблюдении зрительно или для луча радиолокатора?

Для радиоволн ($\lambda > 1$ см) показатель преломления и индекс рефракции почти не зависят от длины волны, но помимо температуры и давления зависят еще от содержания в воздухе водяного пара. При одинаковых условиях изменения температуры и давления радиоволны преломляются сильнее, чем световые, особенно при большой влажности.

Поэтому формулы для определения дальности горизонта или обнаружения предмета лучом радиолокатора будут аналогичны (10.6) и (10.7), но перед корнем будет коэффициент 4,08. Таким образом, выгоднее пользоваться радиолокационной установкой, ее горизонт оказывается дальше примерно на 11%.

Радиоволны хорошо отражаются от земной поверхности и от нижней границы инверсии или слоя пониженной влажности. В таком своеобразном волноводе, образованном земной поверхностью и основанием инверсии, радиоволны могут распространяться на очень большие расстояния. Указанные особенности распространения радиоволн успешно используются в радиолокации.

Расширение и сужение горизонта

Температура воздуха в приземном слое, особенно в его нижней части, далеко не всегда падает с высотой. Она может уменьшаться с разной скоростью, она может не изменяться по высоте (изотермия) и может увеличиваться с высотой (инверсия). В зависимости от величины и знака градиента температуры рефракция может по-разному влиять на дальность видимого горизонта.

Попробуем разобраться в этом с помощью формулы (10.1). После дифференцирования (10.1) по z получим:

$$\frac{\partial n}{\partial z} = (n_0 - 1)\frac{\rho}{\rho_0 T}(\gamma - \gamma_a), \tag{10.8}$$

где $\gamma = -\partial T/\partial z$ — вертикальный градиент температуры в приземном слое; $\gamma_a = 3{,}42°$ C/100 м — вертикальный градиент температуры в однородной атмосфере, в которой плотность воздуха с высотой не изменяется.

Рассмотрим, какой будет траектория луча AB при разных градиентах температуры у поверхности Земли.

Случай 1. Вертикальный градиент температуры $\gamma < \gamma_a$, т. е. $\gamma < 3{,}42°$ C/ /100 м. Рассмотрим такие условия, при которых γ положительный ($0 < \gamma < < \gamma_a$), т. е. температура воздуха убывает с высотой. При этом условии в формуле (10.8) $\partial n/\partial z < 0$, т. е. показатель преломления с высотою убывает и траектория светового луча обращена к земной поверхности своей вогнутой стороной (на рис. 10.7 траектория AB'). Такую рефракцию называют *положительной*. Самую дальнюю точку B' наблюдатель увидит в направлении последней касательной к траектории луча. Эта касательная, т. е. видимый за счет рефракции горизонт, составляет с математическим горизонтом HAH угол Δ, меньший угла d. Угол d — это угол между математическим и геометрическим горизонтом без рефракции. Таким образом, *видимый горизонт поднялся на угол ($d - \Delta$) и расширился,* так как $D > D_0$. При нормальных температурных условиях расширение горизонта составляет 6—7%.

Пусть теперь условия таковы, что γ постепенно уменьшается, т. е. температура с высотой убывает все медленнее и медленнее. Наступит момент, когда γ станет равным 0. Это так называемая изотермия — температура с высотой не изменяется. Далее γ становится отрицательным. Температура уже не убывает, а растет с высотой, т. е. наблюдается инверсия температуры. При описанном процессе — уменьшении γ и его переходе через 0— видимый горизонт будет подниматься выше и выше и наступит момент, когда Δ станет равным 0 (на рис. 10.7 кривая 1a). Видимый геодезический



Рис. 10.8. Явление необычной рефракции в полярных странах.

горизонт поднялся до математического. *Земная поверхность как бы распрямилась, стала плоской!* Геодезическая дальность видимости — бесконечно большая. Радиус кривизны луча стал равным радиусу земного шара.

При еще более сильной температурной инверсии Δ становится отрицательным (кривая 1*б*). Видимый горизонт поднялся выше математического. Наблюдателю в A будет казаться, что он находится на дне огромной котловины. Из-за горизонта поднимаются и становятся видимыми (как бы парят в воздухе) предметы, находящиеся далеко за геодезическим горизонтом (рис. 10.8).

Приведем примеры таких ситуаций. С канадского берега Америки через пролив Смита иногда виден берег Гренландии со всеми строениями на нем. Расстояние до гренландского берега около 70 км, в то время как геодезическая дальность видимости, с учетом высоты строений, не более 20 км. Другой пример. С английской стороны пролива Па-де-Кале из Гастингса случалось видеть французский берег, лежащий через пролив на расстоянии около 75 км.

При наличии сильных температурных инверсий создаются условия для возникновения верхних миражей.

Случай 2. Вертикальный градиент температуры $\gamma = \gamma_a$, т. е. $\gamma = 3{,}42°$ С/100 м. При этом $\partial n/\partial z$ в (10.8) становится равным нулю. *Рефракция отсутствует,* так как плотность воздуха с высотою не изменяется (однородная атмосфера), при этом $D = D_0$.

Случай 3. Вертикальный градиент температуры $\gamma > 3{,}42°$ С/100 м, поэтому $\partial n/\partial z > 0$, т. е. показатель преломления и плотность воздуха с высотою увеличиваются. В этом случае траектория световых лучей обращена к земной поверхности своей выпуклой стороной. Такую рефракцию называют *отрицательной* (на рис. 10.7 кривая 3). Последняя точка на Земле, которую увидит наблюдатель в A, будет B''. *Видимый горизонт* AB'' *сузился и опустился на угол* $(\Delta - d)$.

Большие градиенты температуры создаются летом в дневные часы при сильном нагреве земной поверхности солнечными лучами, особенно в пустынях, в степях. Но большие градиенты могут возникнуть и в средних и даже в северных широтах в летние дни при солнечной погоде: над песчаными пляжами, над асфальтом, над обнаженной почвой. Такие условия являются благоприятными для возникновения нижних миражей.

Подведем итоги проделанного анализа и сформулируем следующее правило: если вдоль направления распространения светового луча в атмосфере плотность воздуха (а значит, и показатель преломления) изменяется, то световой луч будет изгибаться так, что его траектория всегда обращена выпуклостью в сторону уменьшения плотности (и показателя преломления) воздуха.

„Выпуклая“ и „вогнутая“ поверхность воды

При значительном контрасте температур между поверхностью моря и приводным слоем атмосферы возникают явления земной рефракции, аналогичные только что рассмотренным. Приведем два примера.

Холодное море и теплый воздух над ним (случай 1а или 1б анализа рис. 10.7). Световые лучи обращены к Земле своей вогнутой стороной.

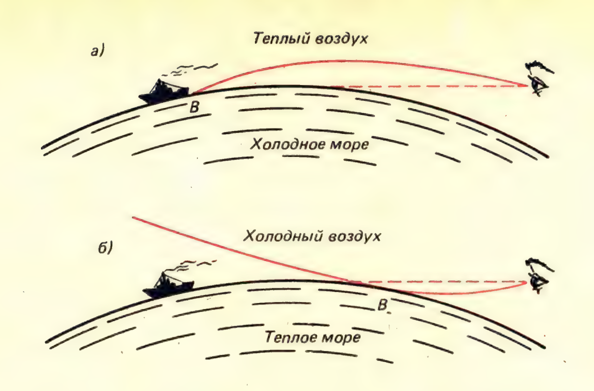


Рис. 10.9. „Вогнутая“ и „выпуклая“ поверхность воды.
а — далекий горизонт, *б* — близкий горизонт.

Удаленные предметы, обычно скрытые горизонтом, поднимаются и приближаются к нам. Создается впечатление, будто земная поверхность распрямилась! Горизонт расширился. Поверхность воды кажется вогнутой. Она как огромная водяная чаша или даже огромное блюдце (рис. 10.9 *а*).

Теплое море и холодный воздух над ним (случай 3 анализа рис. 10.7). Световые лучи обращены к Земле выпуклой стороной. Горизонт кажется близким, суженным. Как будто увеличилась кривизна Земли. Поверхность воды кажется выпуклой. Волны и все предметы на воде выглядят непомерно большими (рис. 10.9 *б*).

Миражи

Кто не слышал о миражах или не читал их описаний, сделанных путешественниками по пустыням Азии и Африки. Появление миража обычно описывается примерно так. По раскаленным Солнцем безжизненным пескам пустыни, страдая от нестерпимой жары и жажды, медленно движется караван верблюдов. И люди и животные давно устали. Вода в бурдюках кончилась. И вдруг вдали, на горизонте, среди песков блеснула полоска воды. Нет, это не узкая полоска, а целое озеро, сверкающее на Солнце! Озеро кажется как бы парящим в воздухе. Его окружают пальмы, среди пальм высятся минареты. Вот они спасительные вода и тень! Люди и животные собирают последние силы и идут, идут, идут... А озеро, как будто отодвигается, оно все так же далеко! Его вид меняется на глазах, то отчетливо видна его сверкающая водная гладь, то оно туманится и, наконец, исчезает совсем. Это был только мираж!

Такие кажущиеся „озера“ жители северной Африки называют „морями дьявола“. В восточных сказаниях и легендах говорится о коварной фее Моргане, которая заманивала путников в пустыню, показывая им хрустальные воздушные дворцы. По имени этой сказочной героини сложного вида миражи и теперь называют „фата-моргана“ (от латинского „фата“ — „фея“).

Миражи в виде озер, водной поверхности можно увидеть не только в пустыне, но и в степях. У нас, в СССР, они часто появляются на Украине, в Поволжье (где их называют маревом), в Казахстане и Средней Азии.

Что же такое мираж? Является ли он реальностью или это плод воображения измученных зноем и жаждой людей? Можно ли мираж запечатлеть объективно, например, сфотографировать или заснять на кинопленку?

Слово мираж французского происхождения и имеет два значения: „отражение" и „обманчивое видение". Оба значения этого слова хорошо отражают сущность явления. Мираж представляет собою изображение реально существующего на Земле предмета, часто увеличенное и сильно искаженное. Мираж можно зарисовать, сфотографировать, заснять на кинопленку, что многократно и делалось. Различают несколько видов миражей в зависимости от того, где располагается изображение по отношению к предмету. Миражи бывают: верхние, нижние, боковые и сложные.

Наиболее часто наблюдаемые верхние и нижние миражи возникают при необычном распределении плотности (и, следовательно, показателя преломления) по высоте, когда на некоторой высоте или у самой поверхности Земли имеется сравнительно тонкий слой очень теплого воздуха (с малым показателем преломления), в котором лучи, идущие от наземных предметов, испытывают полное внутреннее отражение. Это происходит при падении лучей на этот слой под углом больше угла полного внутреннего отражения. Этот более теплый слой воздуха и играет роль воздушного зеркала, отражающего попадающие в него световые лучи.

Верхние миражи

В верхних миражах изображение располагается над предметом. Такие миражи возникают при наличии сильных температурных инверсий, когда плотность воздуха и показатель преломления с высотой быстро уменьшаются.

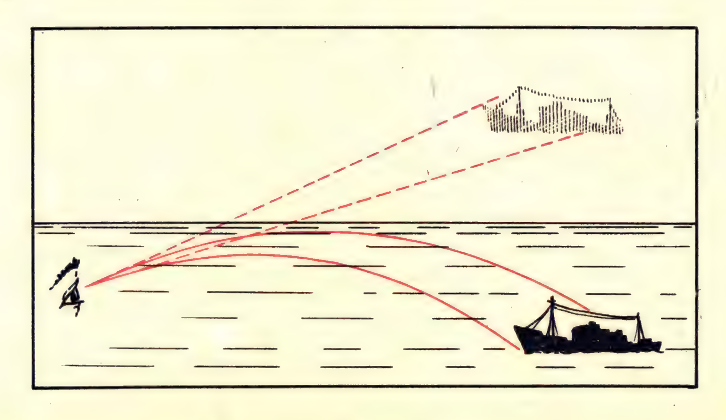


Рис. 10.10. Верхний мираж.

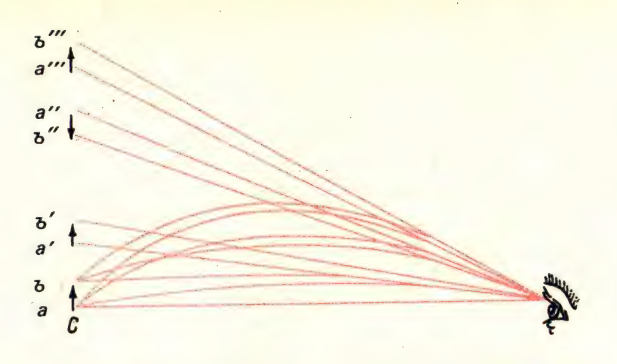


Рис. 10.11. Возникновение верхнего сложного миража.

Траектории световых лучей при возникновении верхних миражей показаны на рис. 10.10. Предположим, что земная поверхность плоская и слои одинаковой плотности расположены параллельно ей. Обозначим показатели преломления слоев n_1, n_2 и т. д. Так как плотность убывает с высотой, то $n_1 > n_2 > n_3 > \dots$ *Теплый слой, играющий роль зеркала, лежит на высоте.* В этом слое, когда угол падения лучей i становится равным показателю преломления ($\sin i = n$), и происходит поворот лучей назад к земной поверхности. Наблюдатель может видеть одновременно сам предмет (если он не за горизонтом) и одно или несколько его изображений над ним — прямых и перевернутых.

На рис. 10.11 показана схема возникновения сложного верхнего миража. Виден сам предмет ab, над ним его прямое изображение $a'b'$, перевернутое $b''a''$ и снова прямое $a'''b'''$. Такой мираж может возникнуть, если плотность воздуха уменьшается с высотой сначала медленно, затем быстро и снова медленно. Изображение получается перевернутым, если лучи, идущие от крайних точек предмета, пересекутся. Если предмет находится далеко (за горизонтом), то сам он может быть и не видим, а его изображения, высоко поднятые в воздух, видны с больших расстояний.

Над холодными морями или над выхоложенной поверхностью суши часто наблюдается расширение горизонта (случай 1 анализа рис. 10.7). Земля как бы немного распрямляется, и из-за горизонта поднимаются и становятся видными очень далекие предметы.

Приведем примеры верхних миражей. Город Ломоносов находится на берегу Финского залива в 40 км от Ленинграда. Обычно из Ломоносова Ленинград не виден совсем или виден очень плохо. Иногда же Ленинград виден „как на ладони." 18 июля 1820 г. известный полярный исследователь В. Скоресби, находясь в Гренландском море, увидел в подзорную трубу и зарисовал восточный берег Гренландии с расстояния в 70 км.

„Призрачные" Земли

К числу верхних миражей, по-видимому, следует отнести хотя бы часть так называемых призрачных Земель, которые десятилетиями разыскивали в Арктике и так и не нашли. Это Земли Андреева, Джиллеса, Оскара, Санникова и другие. Особенно долго искали Землю Санникова.

Яков Санников был охотником, занимался пушным промыслом. В 1811 г. он отправился на собаках по льду к группе Новосибирских островов и с северной оконечности острова Котельный увидел в океане неизвестный остров. Достичь его он не смог — мешали громадные полыньи. Санников сообщил об открытии нового острова царскому правительству. В августе 1886 г. Э. В. Толь во время своей экспедиции на Новосибирские острова тоже увидел остров Санникова и сделал запись в дневнике: «Горизонт совершенно ясный. В направлении на северо-восток, 14—18 градусов ясно увидели контуры четырех столовых гор, которые на востоке соединялись с низменной землей. Таким образом, сообщение Санникова подтвердилось полностью. Мы вправе, следовательно, нанести в соответствующем месте на карту пунктирную линию и надписать на ней: „Земля Санникова"».

Поискам Земли Санникова Толь отдал 16 лет жизни. Он организовал и провел три экспедиции в район Новосибирских островов. Во время последней экспедиции на шхуне „Заря" (1900—1902 гг.) экспедиция Толя погибла, так и не найдя Земли Санникова. Больше Землю Санникова не видел никто. Возможно, это был мираж, который в определенное время года появляется в одном и том же месте. Как Санников, так и Толь, видели мираж одного и того же острова, расположенного в этом направлении, только значительно дальше в океане. Может быть, это был один из островов Де-Лонга. Возможно, это был громадный айсберг — целый ледяной остров. Полярные летчики видели в океане айсберги площадью до 100 км^2. Такие ледяные горы „путешествуют" по океану по несколько лет.

Миражами оказались на поверку Земля Джиллеса, „обнаруженная" им в 1707 г., и Земля Андреева, которую Андреев „увидел" в 1764 г. Многие последующие экспедиции искали и не нашли этих земель, хотя вера в их существование держалась более 100 лет.

Не всегда мираж обманывал людей. Английский полярный исследователь Роберт Скотт в 1902 г. в Антарктиде увидел горы, как бы висящие в воздухе. Скотт предположил, что дальше за горизонтом находится горная цепь. И действительно, горная цепь была позднее обнаружена норвежским полярным исследователем Руалем Амундсеном и как раз там, где и предполагал ее нахождение Скотт.

„Летучий голландец"

Многие, очевидно, слышали легенду о „Летучем голландце", в существование которого в прошлые века верили моряки всего земного шара. „Летучий голландец" — призрачное парусное судно необычайно больших размеров без видимой команды на борту. Оно внезапно появлялось, безмолвно шло, не отвечая на сигналы, и также внезапно исчезало. Встреча с „Летучим голландцем" считалась роковой, надо было ждать шторма или другой беды.

Что же в действительности представлял собой „Летучий голландец"? Это был, без сомнения, верхний мираж, т. е. изображение какого-либо обыкновенного парусного судна, которое спокойно шло где-то далеко за горизонтом, а его увеличенное и искаженное изображение, в виде верхнего миража, поднималось в воздух, и его принимали за „Летучего голландца".

Мираж, естественно, не реагировал ни на какие сигналы с других кораблей. Теперь „Летучий голландец“ в виде парусного судна исчез с морей и океанов, поскольку парусные суда стали редкостью. Увидеть же миражи судов, плывущих за видимым горизонтом, можно довольно часто.

Нижние миражи

Нижние миражи возникают при очень быстром уменьшении температуры с высотою, т. е. при очень больших градиентах температуры $\gamma > 3{,}42°C/100$ м. Это случай 3 анализа рис. 10.7. Роль воздушного зеркала играет тонкий приземный самый теплый слой воздуха (рис. 10.12). Мираж называется нижним, так как изображение предмета помещается под предметом. В нижних миражах кажется, будто под предметом находится водная поверхность и все предметы в ней отражаются.

Мы не удивляемся тому, что если наклониться над водой, то увидишь в ней свое отражение. В спокойной воде также хорошо отражаются все стоящие на берегу предметы. Отражение в тонком нагретом от земной поверхности слое воздуха совершенно аналогично отражению в воде. Только роль зеркала играет сам воздух. Состояние воздуха, при котором возникают нижние миражи, крайне неустойчивое. Ведь внизу, у земли, лежит сильно нагретый, а значит, более легкий воздух, а выше него — более холодный и тяжелый. Поднимающиеся от земли струи горячего воздуха пронизывают слои холодного воздуха. За счет этого мираж меняется на глазах, поверхность „воды“ кажется волнующейся. Достаточно небольшого порыва ветра или толчка и произойдет обрушивание, т. е. переворачивание воздушных слоев. Тяжелый воздух устремится вниз, разрушая воздушное зеркало, и мираж исчезнет.

Благоприятными условиями для возникновения нижних миражей являются однородная, ровная подстилающая поверхность Земли, что имеет место в степях и пустынях, и солнечная безветренная погода.

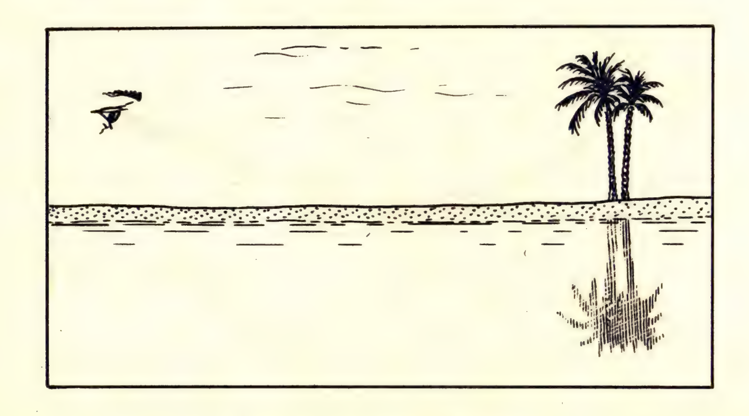


Рис. 10.12. Нижний мираж.

Если мираж есть изображение реально существующего предмета, то сразу же возникает вопрос — изображение какой водной поверхности видят путники в пустыне? Ведь воды в пустыне нет! Дело в том, что кажущаяся водная поверхность или озеро, видимые в мираже, в действительности являются изображением не водной поверхности, а неба. Участки неба отражаются в воздушном зеркале и создают полную иллюзию блестящей водной поверхности. Такой мираж может увидеть любой человек, и для этого совсем не обязательно ехать в пустыню или даже в степь. Они видны летом, в солнечные дни, например в Ленинграде или его окрестностях, над асфальтовыми дорогами или ровным песчаным пляжем.

Вы едете на велосипеде или машине по нагретому Солнцем асфальту. Асфальт совершенно сух. Вдруг впереди заблестит какое-то светлое пятно, как будто лужа на шоссе, в которой отражается солнечный свет. А дальше еще одна такая „лужа". Вы приближаетесь к „луже", а она отодвигается и пропадает. Эти „лужи" на совершенно сухом асфальте или блестящая на Солнце „вода" и есть маленькие миражи — отражение в воздушном зеркале небольших участков неба. По происхождению они совершенно аналогичны миражам пустынь.

Миражи в Антарктиде

Ровная, однородная снежная поверхность в Антарктиде благоприятствует возникновению миражей. Так, например, на станции Восток в 1960 г. зарегистрировано 86 случаев наблюдения миража, а на станции Комсомольская в 1958 г.—138.

Здесь наблюдаются миражи обоих типов. Весной и осенью над выхоложенной подстилающей поверхностью возникают верхние миражи, например такие горы, какие увидел Р. Скотт.

Самое интересное, что летом в Антарктиде появляются нижние миражи. Это объясняется тем, что температура снежной поверхности оказывается выше температуры прилегающего слоя воздуха, так как максимум температуры имеет место на глубине нескольких сантиметров от поверхности снега.

Воздух летом над снежной поверхностью струится, „парит", как над нагретой Солнцем пашней в наших широтах. Появляются плоские кучевые облака вблизи ледяной поверхности на один-два часа около полудня. И это при температуре воздуха — 25... — 30° С!

Боковые миражи

Боковые миражи могут возникнуть в тех случаях, когда слои воздуха одинаковой плотности располагаются в атмосфере не горизонтально, как обычно, а наклонно или даже вертикально (рис. 10.13). Такие условия создаются летом, утром вскоре после восхода Солнца у скалистых берегов моря или озера, когда берег уже освещен Солнцем, а поверхность воды и воздух над ней еще холодные. Боковые миражи неоднократно наблюдались на Женевском озере. Видели лодку, которая приближалась к берегу, а рядом с нею в точности такая же лодка удалялась от берега. Боковой мираж может

8 Зак. 809

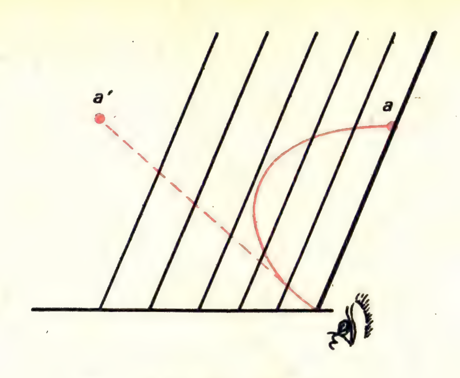


Рис. 10.13. Боковой мираж.

появиться у каменной стены дома, нагретой Солнцем, и даже сбоку от нагретой печи.

Фата-моргана

Сложного вида миражи, или фата-моргана, возникают, когда одновременно есть условия для появления как верхнего, так и нижнего миража, например при значительной температурной инверсии на некоторой высоте над относительно теплым морем. Плотность воздуха с высотой сначала увеличивается (температура воздуха понижается), а затем также быстро уменьшается (температура воздуха повышается). При таком распределении плотности воздуха состояние атмосферы весьма неустойчивое и подвержено внезапным изменениям. Поэтому вид миража меняется на глазах. Самые обыкновенные скалы и дома вследствие многократных искажений и увеличения на глазах превращаются в чудесные замки феи Морганы. Фата-моргана наблюдается у берегов Италии, Сицилии. Но она может возникнуть и в высоких широтах. Вот как описал виденную им в Нижнеколымске фата-моргану известный исследователь Сибири Ф. П. Врангель: „Действие горизонтальной рефракции произвело род фата-морганы. Горы, лежащие к югу, казались нам в разных искаженных видах и висящими в воздухе. Дальние горы представлялись опрокинутыми вниз вершинами. Река сузилась до того, что противоположный берег казался находящимся почти у наших изб“.

На вкладке приведена фотография фата-морганы, которую наблюдали 15 мая 1984 г. на побережье пролива Лонга (полуостров Чукотка). Фата-моргана занимала большое пространство по горизонту. На снимке — только часть панорамы миража. Метеорологические условия в этот день были благоприятными для возникновения сложного миража. Почти полное безветрие. От поверхности Земли до высоты 200 м — сильная температурная инверсия с перепадом температур в 14° С, выше до 500 м — изотермический слой, еще выше до 800 м — слабая инверсия и далее до 2 км — падение температуры с градиентом 0,6° С/100 м. Температура поверхности снега была —9° С, а в 16 км от берега — открытая вода. Это создавало значительные горизонтальные градиенты температуры, также способствовавшие появлению сложного миража.

11. Отражение световых лучей при скользящем падении

Наука сокращает нам опыты быстротекущей жизни.
А. С. Пушкин

Явление Ломоносова

Солнечные лучи или лучи других источников света при определенных условиях могут отражаться от земной атмосферы или атмосфер других планет. Это отражение, хотя его и называют отражением типа зеркального, не является зеркальным в полном смысле этого слова. В отличие от зеркального, отражение в атмосфере происходит не на границе раздела двух сред или слоев (таких четких границ в атмосфере нет), а в некотором слое, толщина которого зависит от конкретных условий, в каждом случае своих. По существу, происходит постепенное, от слоя к слою, преломление лучей и обусловленный преломлением их поворот.

При отражении световых лучей от атмосфер планет наблюдаются явления, аналогичные только что рассмотренным явлениям рефракции света в приземной атмосфере и, в частности, преломлению лучей в случае нижнего миража. Различие состоит в том, что любые миражи, в том числе и нижний, возникают при наличии значительных градиентов температуры (а значит, и плотности) воздуха в определенном слое атмосферы. Если же нет достаточно больших градиентов, то отражение, т. е. выход лучей из слоя или из атмосферы в целом возможен только при скользящем падении лучей. Иными словами, это возможно при углах падения, близких к 90°, когда углы скольжения составляют всего несколько минут. Углом скольжения называют угол, дополнительный к углу падения.

К числу первых наблюдений отражения солнечных лучей от атмосферы Венеры следует отнести наблюдение явления Ломоносова.

Это явление впервые обнаружил М. В. Ломоносов при наблюдении прохождения Венеры по диску Солнца 26 мая 1761 г.

Прохождение Венеры по диску Солнца в 1761 г. наблюдалось более чем 100 астрономами в 40 пунктах земного шара. Цель такого, как бы мы теперь сказали, международного эксперимента состояла в определении солнечного параллакса новым методом, предложенным Галлеем, что было необходимо для уточнения расстояния от Земли до Солнца. По инициативе М. В. Ломоносова в России были организованы три экспедиции для проведения этих наблюдений: в Иркутске, Селенгинске и Тобольске. Две первые не удались, так как была облачная погода. Сам М. В. Ломоносов провел наблюдение за Венерой у себя в домашней обсерватории на реке Мойке в Петербурге, а А. Д. Красильников и Н. Г. Курганов — в обсерватории Академии наук. Прохождение Венеры по диску Солнца длилось с 4 ч утра до 10 ч дня.

Наблюдая вступление Венеры в диск Солнца и ее выход с диска, М. В. Ломоносов сделал два открытия. Первое — он обнаружил у Венеры атмосферу, как он считал, не менее плотную, чем у Земли. Когда Венера только подошла к диску Солнца, солнечный край с этой стороны как бы затуманился, расплылся, хотя до этого был совершенно четким и чистым.

Вторично это произошло, когда, сойдя с диска Солнца, Венера стала удаляться от него. М. В. Ломоносов объяснил, что диск Солнца туманился, потому что Солнце просвечивало через атмосферу Венеры.

Второе явление М. В. Ломоносов обнаружил, когда Венера находилась еще на диске Солнца и уже подходила к самому его краю. В момент схождения Венеры с диска Солнца вокруг ее края появился яркий световой ободок. Это явление и получило название явления Ломоносова. М. В. Ломоносов тогда же совершенно правильно и убедительно объяснил возникновение явления как *результат преломления солнечных лучей в верхних слоях атмосферы Венеры.* По этому поводу им была опубликована статья под названием „Явление Венеры на Солнце, наблюденное в Санкт-Петербургской императорской Академии наук майя 26 дня 1761 г."

В 1952 г. проф. В. В. Шаронов проанализировал описание и рисунки М. В. Ломоносова и установил, что угол горизонтальной рефракции составлял всего 2′. Для сравнения напомним, что угол астрономической рефракции в атмосфере Земли 35′. Это говорит о том, что преломление и отражение солнечных лучей произошло в высоких слоях атмосферы Венеры, лежащих над ее плотным облачным покровом. Явление Ломоносова по своей физической сущности можно трактовать как отражение солнечных лучей от атмосферы Венеры при скользящем падении лучей на атмосферу.

Поскольку Венера проходит через диск Солнца периодически, то в будущем ее прохождение лучше будет наблюдать с орбитальных космических станций или кораблей.

Отражения солнечного и лунного дисков от земной атмосферы и другие явления

Первым наблюдал отражение солнечного диска от земной атмосферы в момент восхода Солнца А. А. Леонов 19 марта 1965 г. на 12-м витке корабля „Восход-2". С высоты полета 495 км он увидел, как над горизонтом стала показываться часть солнечного диска, а под ним, ослабленное по яркости, его отражение. Угол скольжения составлял около 10′. Это наблюдение послужило толчком к написанию А. А. Леоновым картины „На орбите большая космическая станция". На картине изображен восход Солнца и необычайно яркий по своим краскам, светящийся сумеречный слой атмосферы, каким его видит наблюдатель из космоса.

Визуальные наблюдения отражения солнечного диска от земной атмосферы проводились и другими космонавтами, в частности К. П. Феоктистовым и Е. В. Хруновым („Союз-5") и П. И. Климуком („Союз-13").

Фотографирование из космоса восходов или заходов Солнца (с быстрой сменой кадров) позволило запечатлеть это явление на многих кадрах: появляющуюся из-за горизонта часть солнечного диска, окруженного околосолнечным ореолом, а внизу под ним уже на фоне Земли его отраженное изображение.

Американские астронавты с космического корабля „Аполлон-12" на трассе Луна — Земля сфотографировали на цветную пленку сумеречный ореол Земли и часть солнечной короны в тот момент, когда сам диск Солнца был чуть-чуть ниже горизонта, т. е. заэкранирован телом Земли. Такой метод

исследования был назван затменным зондированием. Он применяется в настоящее время для исследования свойств не только солнечной короны, но и земной атмосферы (см. главу 13). На фотографии видно также и отраженное от атмосферы Земли изображение наблюдаемого участка солнечной короны.

П. И. Климуком и В. И. Севастьяновым было сфотографировано зеркальное отражение Луны от земной поверхности („Салют-4“).

В декабре 1973 г. американские астронавты, находившиеся на орбитальной станции „Скайлэб“, с помощью коронографа засняли отражение Солнца от газопылевого хвоста кометы Когоутека. Угол скольжения солнечных лучей составлял около 40′, расстояние кометы до Солнца — примерно 22 млн. км. Исследования яркости отраженного изображения позволили оценить показатель преломления и плотность газопылевых облаков в хвосте кометы.

Отражение солнечных лучей при скользящем падении на приземный слой

У земной поверхности также можно наблюдать световые явления, обусловленные отражением при скользящем падении лучей. Отраженный солнечный свет или свет от наземных источников становится видимым на значительном расстоянии и при определенной пространственной направленности после того, как он испытал отражение от некоторого слоя атмосферы при падении на него под углом, близким к 90°. Расскажем о таких явлениях.

Корона над Эльбрусом наблюдается в дни, близкие к зимнему солнцестоянию, и только из аулов, расположенных к северу от Эльбруса. При ясном небе, когда Солнце заходит, опускаясь в долину, между двумя вершинами Эльбруса появляется свечение в виде веера поднимающихся огненных лучей, как прожекторами освещающих снежные склоны вершин Эльбруса и небо над ними. Длится свечение всего 3—4 мин. Появление „короны“ над Эльбрусом говорит о том, что Солнце поворачивает к лету и начинает прибывать день. После зимнего солнцестояния свечение не наблюдается, так как точка захода Солнца перемещается к западу.

Явление, получившее название „*таинственные огни Мпары*“, наблюдается по вечерам из окрестностей деревни Кильва-Масохо в Танзании. Деревня находится на побережье Индийского океана. На юго-запад от нее в 12 км поднимается горная цепь Мпара. По вечерам на склонах гор появляются таинственные огни, напоминающие отблеск пламени. О существовании этих огней знали еще с древних времен. Все попытки найти источники света в горах ни к чему не привели. Огней не было.

Этим странным явлением заинтересовались ученые. Был высказан ряд гипотез (свечение при электрических разрядах, при радиоактивном распаде и т. д.), но все они оказались несостоятельными, так как никаких огней или свечения в горах обнаружить не удалось. Огни наблюдаются только на значительном расстоянии от горных склонов и только из определенного направления. Такая довольно высокая пространственная направленность огней Мпары подсказывает, что причину их следует искать в отражении солнечных лучей в некотором слое земной атмосферы, когда Солнце уже находится далеко под горизонтом.

Возникновение огней Мпары совершенно аналогично происхождению короны над Эльбрусом.

ОСВЕЩЕННОСТЬ ЗЕМЛИ В РАЗНОЕ ВРЕМЯ СУТОК

12. Дневной свет

Да здравствует Солнце, да скроется тьма!

А. С. Пушкин

Цвет окружающих нас предметов

Солнечный световой поток, поступающий на внешнюю границу атмосферы, как уже говорилось, создает там освещенность 135 000 лк. В земной атмосфере часть светового потока рассеивается и участвует в создании освещенности Земли рассеянным светом. Земная поверхность получает, таким образом, солнечный свет в виде прямого света солнечных лучей и в виде рассеянного света, поступающего от небосвода, который, в свою очередь, складывается из света, рассеянного самой атмосферой, и света, рассеянного всеми облаками, имеющимися на небе.

Окружающие нас предметы на Земле, будучи освещены одним и тем же источником света, например Солнцем, а если оно скрыто облаками — светом от небосвода, оказываются окрашенными различно. *Отражение света*, как и рассеяние, *происходит селективно*, т. е. избирательно. Поверхности того или иного предмета отражают лучи разных длин волн, т. е. разных цветов, по-разному. Если в какой-то части спектра отражение больше, чем в других, то поверхность окрашивается в этот цвет. *Цвет каждого предмета определяется цветом отраженных от него лучей.* Сочная зелень деревьев и лугов, золотистые оттенки зреющих посевов соседствуют с желтыми и красноватыми песчаными откосами и пляжами. Необыкновенно богат цветовыми тонами мир цветов: голубые незабудки, синие колокольчики, розовые гвоздики и иван-чай, красные маки и т. д. А яркие окраски стрекоз, бабочек, некоторых птиц могут соперничать с цветовой гаммой, которую мы встречаем на полотнах художников,в расцветке тканей и других предметов, создаваемых человеком.

Бесконечное разнообразие цветовых тонов, оттенков, тончайших переходов от одного цвета к другому, которое мы наблюдаем в окружающей нас природе, все это — цветовое богатство мира отраженного солнечного света. Воспринимать такое богатство цветов, как уже говорилось в главе 8, мы можем только при достаточно высоком уровне освещения, создаваемом дневным светом.

Дневная освещенность

Прямой и рассеянный солнечный свет, достигая земной поверхности, отражаются от нее и поступают назад в атмосферу. Здесь они снова участвуют в рассеянии, и часть их снова возвращается к земной поверхности, увеличивая ее освещенность.

Роль каждого из рассматриваемых источников, величина его вклада в общую освещенность определяются временем суток (положением Солнца на небосводе), облачностью, прозрачностью атмосферы и отражательной способностью (альбедо) подстилающей земной поверхности. Поскольку в нашу задачу не входит подробное рассмотрение этих вопросов, ограничимся приведением самых общих характеристик.

В освещении Земли в дневные часы участвуют все три названных источника. При ясном или малооблачном небе ведущая роль принадлежит Солнцу. Диапазон изменения освещенности прямым солнечным светом необычайно велик: от нуля в моменты восхода и захода Солнца до нескольких десятков тысяч люкс (и даже до 100 тыс. лк) около полудня. Освещенность рассеянным светом в течение дня изменяется значительно меньше. Она составляет около 500 лк в моменты, близкие к восходу или заходу, и не превышает в среднем 13—15 тыс. лк в околополуденные часы при безоблачном небе.

На освещенность рассеянным светом большое влияние оказывают облака — их количество, форма, расположение на небосводе. Облака высоко-кучевые, слоисто-кучевые или просто кучевые, покрывающие все или значительную часть неба, но при солнечном диске свободном от облаков и при больших высотах Солнца могут в два-три раза и более увеличить освещенность рассеянным светом. В то же время низкие плотные облака слоистых форм (слоисто-дождевые, слоистые и другие) при малых высотах Солнца уменьшают освещенность в несколько раз, как это наблюдается, например, в зимние месяцы в арктических районах. Вклад в освещенность отраженного светового потока определяется величиной альбедо подстилающей поверхности. У различных почвенных и растительных покровов альбедо обнаруживает большую изменчивость. Его величина колеблется от 6—10 до 30—40%.

Наибольшее влияние на увеличение освещенности земной поверхности оказывает снежный покров. Альбедо сухого свежевыпавшего снега приближается к 100%. Правда, у загрязненного и влажного снега оно снижается почти до 30%. Отраженный от снежного покрова световой поток способствует увеличению освещенности рассеянным светом. Вспомните, насколько светлее и чище становится вокруг, когда на Землю ложится первый снег.

Наиболее значительное увеличение освещенности за счет отражения от снежного покрова происходит при наличии слоистообразных форм облаков при больших высотах Солнца. В этих условиях рассеянный световой поток, прошедший через облако и достигший Земли, многократно отражаясь от поверхности снега и нижней кромки облаков, может увеличить освещенность рассеянным светом в два-три раза. Такие условия имеют место в арктических районах летом. В средних широтах, например в Ленинграде, облака летом увеличивают освещенность в среднем на 50—60%, а зимой, наоборот, уменьшают ее на 20%. Это объясняется тем, что летом в Ленинграде высоты Солнца большие и преобладают облака кучевых форм, увеличивающие освещенность. Зимой же и высоты Солнца малые и чаще всего наблюдаются облака слоистых форм, уменьшающие освещенность.

Освещенность прямыми солнечными лучами и рассеянным светом вместе составляют суммарную освещенность.

Может ли суммарная освещенность на Земле быть больше заатмосферной?

Задумаемся над этим вопросом. Может ли суммарная освещенность, измеренная у Земли, достичь или превысить заатмосферную? На первый взгляд кажется, что это невозможно в принципе. Если бы это имело место, то на этой основе можно было бы создать новый „перпетуум мобиле". И тем не менее, оказывается, что может быть, и это неоднократно наблюдалось!

А при каких условиях, вы уже, возможно, и сами догадались по предыдущему изложению. Это происходит при высокой прозрачности атмосферы и большой высоте Солнца (т. е. при условиях, необходимых для того, чтобы освещенность прямым светом достигла максимальных значений) и при наличии такой облачности, которая в несколько раз увеличивает освещенность рассеянным светом. Иными словами, это происходит, когда облака кучевых форм типа слоисто-кучевых или высоко-кучевых покрывают все небо, но Солнце светит в просвет между облаками.

В Павловске (под Ленинградом) максимальная измеренная суммарная освещенность (22 июня, при самой большой высоте Солнца) была равна 132 200 лк, а в более южных широтах Советского Союза, например в Караганде, наблюдалась освещенность 150 000 лк и больше.

Теперь поясним, как это происходит, и проверим, нет ли здесь нарушения закона сохранения энергии.

Как мы знаем, освещенность на внешней границе атмосферы составляет 135 000 лк, у поверхности Земли она может уменьшиться, например, до 100 000 лк, т. е. из освещенности прямым светом за счет ослабления в атмосфере теряется 35 000 лк. Рассеянная освещенность, создаваемая всем небосводом при больших высотах Солнца и указанных условиях облачности, может быть больше 35 000 лк. Вот и получается, что суммарная освещенность превышает заатмосферную. Облака играют роль экрана, отражающего назад к Земле потоки отраженного и рассеянного света, которые в отсутствие облаков ушли бы в мировое пространство.

Есть и еще одна причина — разная методика измерения освещенности прямым и рассеянным светом. Поток прямого солнечного света, как и прямая солнечная радиация, принимается на приемник из малого телесного угла, вырезающего на небосводе только сам солнечный диск и околосолнечное кольцо. Рассеянный свет, как и рассеянная радиация, поступает на приемник от всего небосвода.

Световой климат

Световой климат любого района земного шара характеризуется суммами освещенности, создаваемой прямым солнечным светом, суммами освещенности рассеянным светом и суммами суммарной освещенности, составленными за различные интервалы времени (час, день, декаду, месяц, вегетационный период, год). Данные о световом климате используются в ряде отраслей народного хозяйства: в сельском хозяйстве, медицине, строительстве и других. Приведем примеры. Среди растений есть более светолюбивые, такие, например, как кукуруза, сосна, и менее светолюбивые (теневыносливые) — гречиха, ель. Для успешного развития теневыносливых сельскохозяйственных культур не только не нужен, но даже вреден избыток прямого солнечного света. Поэтому при районировании культур учиты-

ваются данные о световом климате. Строительные организации при составлении норм на размер и ориентацию окон жилых и производственных зданий также используют сведения о световом климате в разных климатических районах. Эти данные нужны и городскому хозяйству при планировании необходимой освещенности внутри зданий и на улицах городов.

При анализе данных о световом климате выявляется большая роль освещенности рассеянным светом в ряде районов земного шара, в частности в Арктике, где в летние месяцы преобладают облака слоистых форм. Доли рассеянной и прямой освещенности в годовой сумме суммарной освещенности на о. Уединения соответственно 79 и 21%, на м. Шмидта — 65 и 35%, в то время как в Ленинграде они равны 44 и 56%, а в Давосе (Швейцария) —22 и 78%.

Для составления данных о световом климате необходимо иметь систематические измерения освещенности и притом за достаточно длительный период. К сожалению, даже в самых развитых странах измерения освещенности проводятся только в очень небольшом числе обсерваторий.

Для получения необходимых сведений об освещенности и световом климате используются результаты измерений солнечной радиации (прямой, рассеянной, суммарной) на обширной сети актинометрических станций, которые пересчитываются на соответствующую освещенность с помощью коэффициента, получившего название светового эквивалента радиации. *Световым эквивалентом радиации К* называется отношение освещенности к одновременно измеренному потоку солнечной радиации.

Для приближенных оценок можно пользоваться одним значением светового эквивалента при любых облаках и всех высотах Солнца более 10^0: для прямой радиации —93 лк/(Вт·м^2), для рассеянной — 107 и для суммарной 100 лк/(Вт·м^2).

Освещенность других планет Солнечной системы

Одним из необходимых условий существования жизни на других планетах Солнечной системы является наличие определенного не только теплового, но и светового режима. Каковы же освещенность солнечным светом других планет? Каковы их световые солнечные постоянные?

Заатмосферная освещенность планет Солнечной системы

Планета	Среднее расстояние от Солнца, млн. км	Заатмосферная освещенность, лк	Сравнение со световой солнечной постоянной Земли (E_0) или с освещенностью на Земле*
Меркурий	57,87	900 000	6,7 E_0 Земли
Венера	108,14	260 000	1,9 E_0 Земли
Земля	149,50	135 000	
Марс	227,79	58 000	При $h_\odot \approx 40°$
Юпитер	777,8	5 000	При $h_\odot \approx 5{,}5°$
Сатурн	1426,1	1490	При $h_\odot \approx 1{,}3°$
Уран	2867,7	368	Начало гражданских сумерек на Земле
Нептун	4494	150	
Плутон	9508	111	

* Если заатмосферная освещенность планеты меньше земной, то приведены высоты Солнца $h_\odot$ или время суток, при которых на Земле имеет место такая освещенность, вычисленная по средним многолетним данным (при ясном небе в Павловске, под Ленинградом).

Из таблицы видно, что заатмосферная освещенность на Меркурии в 6,7 раза, а на Венере почти в два раза больше, чем на Земле. На Марсе освещенность такая, как на Земле в ясный полдень весной или осенью. На Юпитере и Сатурне — такая, как на Земле, когда Солнце уже склоняется к горизонту. Хуже всего освещены Уран, Нептун и Плутон. Там всегда сумерки или ночь. Таких светлых дней, как на Земле, не бывает никогда.

Действительная освещенность у поверхности каждой планеты, если она окружена плотными облаками, как Венера, может быть значительно меньше.

А как обстоят дела с освещенностью земного спутника Луны? Аналогичные расчеты для Луны в моменты ее нахождения на самом большом ($149{,}9 \cdot 10^6$ км) и самом малом ($149{,}1 \cdot 10^6$ км) расстояниях от Солнца дают следующие световые лунные постоянные: 135 000 лк и 136 000 лк. Как и следовало ожидать, освещенность Луны такая же, как и Земли, поскольку расстояние от Луны до Земли (384 000 км) составляет менее 0,2% расстояния от Земли до Солнца. Изменяются световые солнечные постоянные Земли и Луны при перемещении их от точки афелия к точке перигелия всего на 0,7%, т. е. менее 1%.

Несмотря на то что освещенность на Луне такая же по величине, как на Земле, условия освещения существенно различаются. Ввиду отсутствия атмосферы, на Луне нет рассеянного света и освещенность предметов такая, как если бы они находились в луче прожектора — резкие контрасты света и тени. После захода Солнца мгновенно наступает ночь, нет фазы сумерек, смягчающих резкую смену освещенности.

13. Сумерки

Часы бегут. Ночная тень
Не раз сменяла зной палящий,
Не раз всходя, лазурный день
Свивал покров с природы спящей.

А. К. Толстой

Виды сумерек

После захода Солнца земная поверхность освещается рассеянным светом, исходящим от той части небосвода, которая еще освещена солнечными лучами. По мере погружения Солнца под горизонт освещенность Земли сначала уменьшается быстро, потом все медленнее и медленнее, и постепенно наступает полная ночная темнота. Переход ото дня к ночи и от ночи ко дню на Земле, благодаря наличию атмосферы и ее способности рассеивать свет, происходит не мгновенно с заходом Солнца, а растягивается на некоторый промежуток времени, называемый сумерками.

Различают сумерки утренние и вечерние. В дальнейшем будем говорить в основном о вечерних сумерках. В утренние сумерки все явления протекают

в обратном порядке. Одна граница сумерек определенная — она характеризуется моментами восхода или захода Солнца. Вторая граница — время наступления полной ночной темноты — неопределенная. В связи с этим различают несколько видов сумерек в зависимости от глубины погружения Солнца под горизонт и уровня освещенности на Земле.

Сумерки гражданские начинаются с момента захода Солнца и заканчиваются при глубине погружения Солнца 6—8°. В конце этих сумерек в помещениях приходится включать искусственное освещение. В гражданской жизни наступила ночь, отсюда и название сумерек. На открытом воздухе трудно читать даже крупный текст. На небе становятся видны самые яркие звезды.

Сумерки морские, или *навигационные*, начинаются с конца гражданских сумерек и заканчиваются при глубине погружения Солнца 12°. В конце этих сумерек освещенность уменьшается настолько, что судовые штурманы не могут ориентироваться по неосвещенным предметам на берегу. Можно отчетливо различить только линию горизонта. В это время и должны включаться все сигнальные и опознавательные огни на берегу и на воде (маяки, бакены и т. п.).

Сумерки астрономические начинаются с конца навигационных сумерек и заканчиваются при глубине погружения Солнца 18°. К этому времени исчезают следы зари, на небе появляются все звезды и астрономы могут выполнять любые измерения.

При ясном небе освещенность земной поверхности к моменту захода Солнца составляет около 1000 лк, к концу гражданских сумерек она уменьшается до нескольких люкс (1—4), к концу навигационных — до тысячных или одной сотой доли люкса ($\approx 0{,}006$) и к концу астрономических — до десятитысячных долей люкса ($10^{-4}-10^{-5}$). Таким образом, *на протяжении сумерек освещенность земной поверхности изменяется в десятки и сотни миллионов раз!*

Продолжительность сумерек зависит от времени года (склонения Солнца) и от широты места. Самые длинные сумерки — в дни летнего и зимнего солнцестояний (22 июня и 22 декабря), самые короткие — в дни весеннего и осеннего равноденствий (21 марта и 23 сентября). С увеличением широты места длительность сумерек увеличивается, и на широтах более 60° полуночная глубина погружения Солнца не достигает 18°, т. е. вечерние сумерки переходят в утренние. Наступают *белые ночи*, которыми так знаменит Ленинград. Освещенность небесного свода даже в полночь близка к вечерней. В полярных областях земного шара на широтах более 66°33′, когда наступает *полярный день*, сумерек не бывает совсем, так как Солнце не опускается под горизонт.

Освещенность Земли в сумерки

Как же осуществляется освещение земной поверхности во время сумерек? Обратимся к рис. 13.1. На рисунке SS' — поток солнечных лучей. Он освещает Землю и атмосферу. Заход Солнца происходит в точке касания лучами земной поверхности (E). Касательная EB является границей света и тени и называется *терминатором*. Часть атмосферы, лежащая выше терминатора, еще освещена прямыми солнечными лучами и участвует

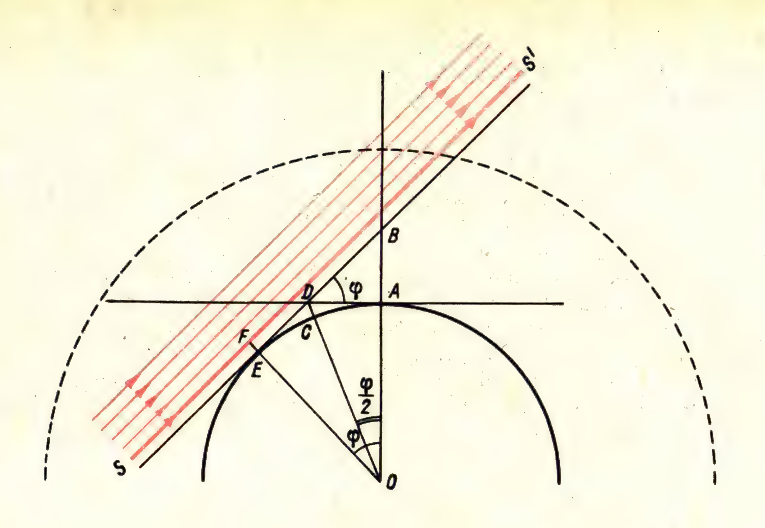


Рис. 13.1. Освещение земной поверхности в сумерки.

в рассеянии солнечного света. Она посылает рассеянный свет во все направления, в том числе и к наблюдателю в точку A. Часть атмосферы, расположенная ниже терминатора, оказалась в тени Земли и в рассеянии солнечного света уже не участвует. В точке A, где находится наблюдатель, уже начались сумерки, Солнце погрузилось под горизонт на угол $h_{\odot}$, численно равный центральному углу φ.

Высоту нижней границы атмосферы, еще освещенной солнечными лучами и посылающей рассеянный свет во время сумерек, можно вычислить по простым формулам:

а) в направлении на зенит $AB = H$

$$H = R(\sec\varphi - 1), \qquad (13.1)$$

б) в направлении на горизонт $CD = h$

$$h = R(\sec\varphi / 2 - 1), \qquad (13.2)$$

где R — радиус земного шара (6370 км).

По мере погружения Солнца под горизонт терминатор поднимается выше и выше, и часть атмосферы, еще освещенная солнечными лучами, уменьшается, а потому и освещенность в точке A постепенно снижается, переходя в ночную темноту.

Приведем численные значения H и h в конце разных видов сумерек:

	H км	h км
В конце гражданских сумерек . . .	51	12,7
„ навигационных „ . . .	140	38
„ астрономических „ . . .	325	76

Можно ли считать, что, когда закончились сумерки и наступила ночь, атмосфера уже не участвует в рассеянии солнечного света, а значит, и в освещении земной поверхности? Оказывается, нельзя!

Действительно, приведенные значения высот H и h говорят, что даже после окончания астрономических сумерек слои атмосферы выше 76 км в направлении на горизонт и выше 325 км — на зенит еще освещаются прямыми солнечными лучами и посылают рассеянный свет к земной поверхности.

Наблюдения за изменением яркости неба во время сумерек впервые были использованы для определения высоты самой атмосферы известным ученым средневековья Альгазеном. Резкое убывание яркости неба, по мысли Альгазена, должно было соответствовать границе атмосферы. Определив этот момент, Альгазен получил высоту атмосферы в 52 000 шагов, что соответствует приблизительно высотам 26—31 км, т. е. границе нижней стратосферы. Для того времени такой результат следует считать хорошим, так как выше содержится не более 0,1% всей массы атмосферы.

Сумеречный метод

Быстрое изменение освещенности во время сумерек и возможность в любой момент сумерек и в любом направлении точно определить, на какой высоте проходит тень Земли (терминатор), т. е. какие слои в этот момент выключаются из освещения солнечным светом или, наоборот, начинают им освещаться, делают сумеречные наблюдения особенно ценными для исследования вертикальной структуры атмосферы.

Сумеречный метод впервые был предложен в 1923 г. В. Г. Фесенковым и получил дальнейшее развитие в исследованиях Н. М. Штауде. Большой вклад в теоретическое обоснование, совершенствование и применение метода был сделан Г. В. Розенбергом.

Для ознакомления с идеей метода вернемся к рис. 13.1. Сумеречный метод заключается в измерении яркости неба, т. е. яркости рассеянного света, поступающего из определенного выбранного направления на небосвод на протяжении сумерек. Рассеянный свет в точку A, где находится наблюдатель, посылает вся атмосфера, лежащая выше терминатора, но практически оказывается, что хотя и освещена большая толща атмосферы, но львиную долю света посылает сравнительно небольшой по толщине слой — порядка 20 км. Центр тяжести этого слоя лежит выше терминатора над местом захода Солнца примерно на 20 км. Этот слой является эффективным рассеивающим слоем в любой момент сумерек. Он был назван поэтому *сумеречным слоем*. Пучок солнечных лучей, падающий на этот слой и вносящий главный вклад в яркость сумеречного неба в любом направлении, назвали *сумеречным лучом*.

Сумеречный слой ограничен сверху вследствие быстрого убывания плотности воздуха с высотой. Хотя вышележащие слои хорошо освещены солнечными лучами, этим лучам „не на чем рассеиваться", так как в указанных слоях мала плотность воздуха. Сумеречный слой ограничен снизу вследствие быстрого возрастания показателя ослабления лучей в направлении земной поверхности. Все нижележащие слои также не посылают рассеянного света — им „нечего рассеивать", так как лучи доходят до них

слишком ослабленными. На рис. 13.1 сумеречный луч показан двойным пунктиром (SS'). Сумеречный луч всегда проходит над местом захода Солнца на высоте порядка 20 км. Высоту эффективного рассеивающего слоя в любой момент сумерек наиболее просто определить в направлении на зенит по формуле (13.1), прибавив к полученной высоте еще 20 км. Ошибка, которую мы делаем в вычислениях, невелика, поскольку при небольших углах погружения Солнца, для которых применим этот метод (до 10—12°), $\cos\varphi \approx 1$. При опускании Солнца под горизонт сумеречный луч поднимается все выше и выше, зондируя таким образом атмосферу.

Если сумеречный луч пересекает аэрозольный слой, то яркость рассеянного света скачком увеличивается. Поэтому по результатам сумеречного зондирования можно выявить аэрозольные слои, определить их высоту, вертикальную протяженность. Зондирование атмосферы сумеречным методом проводится начиная с высоты 20—30 км и до высоты 100—120 км.

Изложенное выше о сумеречном слое и сумеречном луче дает лишь первое, наглядное, но относительно грубое представление о процессах рассеяния, происходящих во время сумерек, и о простейшем сумеречном методе. Разработаны и применяются другие, более совершенные, но и более сложные методы сумеречного зондирования атмосферы, например метод эффективных высот земной тени Г. В. Розенберга.

Спектральные и поляризационные наблюдения сумеречным методом принесли много неожиданных и интересных данных о составе и свойствах атмосферы на разных высотах. Например, была обнаружена сумеречная „вспышка“ двойной желтой линии натрия. Каждый школьник знает о таком явлении: если на горящий газ или свечку бросить щепотку поваренной соли, в пламени появляются желтые язычки. Это светится натрий. Желтая линия натрия имела максимальную яркость, когда земная тень (терминатор) достигала высот 50—60 км. Значит, слой максимальной концентрации атомов натрия лежал на высоте 70—80 км. Позже были обнаружены более слабые сумеречные вспышки других атомов и молекул,

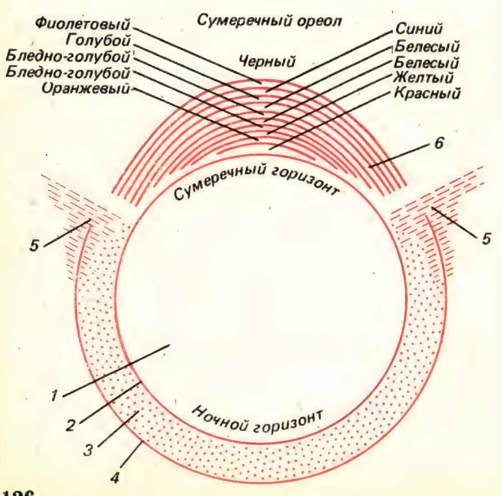


Рис. 13.2. Свечение атмосферы в сумерки и ночью по наблюдениям с космического корабля „Союз-9“ в июне 1970 г. *1* — Земля, *2* — яркий слой у ночного горизонта, *3* — слой ночного свечения атмосферы, *4* — яркая верхняя граница ночного свечения атмосферы, *5* — область вертикально-лучевой структуры, *6* — сумеречный ореол.

входящих в состав воздуха на разных высотах: молекул ионизированного азота (N_2^+), системы полос гидроксила (OH), красной линии атомарного кислорода (O), полос молекулярного кислорода (O_2), лития (Li), гелия (He) и других. Было обнаружено, таким образом, *сумеречное излучение атмосферы*. Невидимое с Земли, оно хорошо видно из космоса в виде светящегося ореола над сумеречным горизонтом Земли. Свечение сумеречной атмосферы иногда приобретает характерный вид, названный „эффектом усов“ (рис. 13.2).

Сумеречный ореол из космоса

Световые явления, наблюдающиеся из космоса в сумерки и в другое время суток, разнообразны и необыкновенно ярки. Подробнее они изложены в главе 15. Здесь остановимся только на зондировании из космоса сумеречного ореола.

Когда космический корабль находится на ночной стороне Земли и приближается к дневному терминатору, сумеречный горизонт оказывается окруженным необычайно ярким цветным ореолом (рис. 13.2). Угловая высота ореола около 4° при высоте полета космического корабля 230—240 км. У самой поверхности Земли насыщенный красно-оранжевый цвет ореола плавно переходит в оранжево-желтый, желтый. Выше идет узкая полоска темно-синего цвета пониженной яркости, над ней голубой цвет сменяется светло-голубым, белесоватым и постепенно осуществляется переход к черно-фиолетовому цвету космического пространства. Вид цветовой гаммы ореола определяется, кроме того, высотой корабля и глубиной погружения Солнца. При наличии облаков картина ореола сохраняется, но тона, прилегающие к земной поверхности, становятся пурпурно-красными. Такой же цвет имеют и все просветы — разрывы в облаках.

Зондирование сумеречного ореола из космоса заключается в измерении углового распределения яркости рассеянного света внутри ореола как функции высоты над земной поверхностью и длины волны. Путем решения обратной задачи теории рассеяния (см. главу 2) удается получить приближенный высотный ход, т. е. изменение с высотой, объемного коэффициента аэрозольного рассеяния.

Наблюдения с космических кораблей и со спутников сумеречного ореола, а также тонких аэрозольных слоев и слабосветящихся аэрозольных слоев имеют большие преимущества перед наземными. Во-первых, при наблюдении этих слоев в косом направлении (под малыми углами к горизонту) путь, проходимый лучом, а значит, и яркость рассеянного света возрастают в несколько десятков раз. Во-вторых, при наблюдении под малыми углами основную яркость рассеянного света создает однократное рассеяние в силу большой вытянутости индикатрисы аэрозольного рассеяния в направлениях близких к углу рассеяния 0° (вспомните „длинный язык“ индикатрисы аэрозольного рассеяния рис. 2.2). Поэтому тонкие аэрозольные слои, невидимые с Земли, становятся хорошо различимыми из космоса в виде темных полос на фоне зари, когда космический корабль находится на ночной стороне Земли, и в виде более светлых полос на фоне дневного неба, когда корабль переходит на дневную сторону.

Обратим внимание читателя еще раз на то, что в основе обоих изложенных сумеречных методов зондирования (с поверхности Земли и из космоса) лежат измерения общей и спектральной яркости рассеянного света, его углового распределения (т. е. построение индикатрис рассеяния на разных высотах в ореоле) и характеристик поляризации. Таким образом, в этих методах, как и в изложенных ранее в главе 2, измерение характеристик рассеянного света помогает раскрыть „секреты" процессов, происходящих на различных высотах в атмосфере.

Аэрозольные слои фотографировались многими космонавтами, а первые снимки были получены В. В. Терешковой и К. П. Феоктистовым. Сравнительно устойчивым оказался слой на высоте 19—20 км. Иногда наблюдалось несколько слоев в интервале высот 11—25 км, появлялись слои и на других высотах.

Метод „затменного" зондирования

Идея зондирования сумеречного ореола из космоса положена в основу и метода „затменного" зондирования, который был разработан в Ленинградском государственном университете под руководством акад. К. Я. Кондратьева. В отличие от зондирования сумеречного ореола, при котором определяется высота и интенсивность центра тяжести рассеянного света, в этом методе определяется высота и интенсивность центра тяжести поглощенного солнечного света. Во время восхода или захода Солнца, когда самое Солнце еще затенено Землей, а слои атмосферы уже освещены солнечными лучами, производится быстрое фотографирование (каждые 1,5 с) спектрографом спектра солнечной радиации. По интенсивности полос поглощения озона, водяного пара и аэрозолей в спектрах судят об их концентрации на разных высотах. Первые измерения этим методом были выполнены космонавтами П. И. Климуком и В. И. Севастьяновым на орбитальной станции „Салют-4" в 1975 г. Работы в развитие метода продолжаются. Метод применяется в интервале высот от 15—20 км до 70—80 км для определения вертикального профиля концентрации озона, водяного пара и аэрозолей.

Серебристые облака

С поверхности Земли во время сумерек иногда можно увидеть необыкновенно красивые облака серебристо-синего цвета, настолько тонкие, что сквозь них видны звезды. Высота облаков довольно постоянна: 80—85 км. За свой цвет облака были названы серебристыми. Серебристые облака видны в те моменты сумерек, когда они еще хорошо освещены солнечными лучами и сумеречным ореолом Земли и посылают рассеянный свет. Как только они попадают в тень Земли, они становятся невидимыми. С Земли серебристые облака можно наблюдать при глубинах погружения Солнца под горизонт от 6 до 16°, лучше всего при 8—12°.

В северном полушарии серебристые облака появляются с марта по октябрь, чаще всего летом. Максимум повторяемости этих облаков при-

ходится на интервал широт 55—60°, иногда их можно видеть и в более обширном поясе широт: от 45 до 71°.

Большие возможности исследования серебристых облаков открываются при наблюдении из космоса, поскольку в этом случае, во-первых, не мешает облачность и более плотные нижние слои атмосферы, во-вторых, яркость серебристых облаков при наблюдении с космического корабля в касательном к слою облаков направлении, как бы „с ребра", в десятки раз больше, чем при наблюдении с Земли.

Наблюдали и фотографировали серебристые облака экипажи многих космических кораблей („Союз-9", „Салют-4", „Салют-6" и других). В. И. Севастьянов так описывает впечатление от серебристых облаков, наблюдаемых из космоса: „Серебристые облака завораживают. Холодный белый цвет — чуть матовый, иногда перламутровый. Структура либо очень тонкая и яркая на границе абсолютно черного неба, либо ячеистая, похожая на крыло лебедя, когда облако проектируется на фон Земли".

Как было обнаружено, серебристые облака могут занимать большие площади, полосы их тянутся, захватывая половину земного шара и более. Наблюдались двух- и даже трехъярусные облака. Иногда их поверхность была волнистой. Из космоса серебристые облака наблюдаются на любых широтах вплоть до околополюсных и экватора. На дневной стороне также могут проводиться наблюдения за этими облаками при условии устранения световых помех (от Солнца, земного и атмосферного ореолов) на иллюминаторах корабля.

В результате наблюдений с космических кораблей установлены закономерности суточных и сезонных изменений повторяемости серебристых облаков.

Чем объясняется такое внимание к наблюдению за этими облаками? Дело в том, что они появляются на высотах 80—85 км. Этим высотам соответствует так называемая мезопауза — переходный слой между мезосферой и термосферой. Наблюдения за серебристыми облаками, установление зависимости частоты их появления от различных гео- и гелиофизических причин (солнечной активности, свечения атмосферы ночью, состояния ионосферы, метеорных потоков и т. д.) позволяют исследовать процессы, протекающие в мезосфере.

Возникновение в мезопаузе серебристых облаков обусловлено образованием аэрозольного слоя вулканического или метеоритного происхождения. Частицы аэрозолей служат ядрами сублимации для образования серебристых облаков. Есть и другие гипотезы о происхождении серебристых облаков. Вопрос этот пока еще остается открытым.

Из чего состоят серебристые облака? Многие ученые считают, что серебристые облака состоят из льда, возможно, загрязненного космической пылью. Есть другая точка зрения, согласно которой ядра частичек облака металлические (железные или никелевые) и имеют метеорное происхождение, а сверху покрыты ледяной оболочкой. Средний размер частичек ориентировочно оценивается в 0,13—0,15 мкм. По-видимому, имеются и более мелкие частички метеорной пыли, создающие серебристый или перламутровый цвет этих облаков.

9 Зак. 809

14. Заря

Встала из мрака младая с перстами пурпурными Эос.

Гомер

Сияние зари

Заря — одно из наиболее красочных световых явлений природы, воспетое поэтами всех времен и народов. С зарей связано много легенд, сказаний, мифов. Зарю обожествляли. Древние греки считали, что заря наступает, когда розовоперстая Эос мчится на колеснице, запряженной белыми лошадьми, возвещая появление своего брата Гелиоса — бога Солнца. Римляне называли богиню утренней зари Авророй.

Образ зари всегда был популярен в искусстве, он нашел отражение в скульптуре, живописи, музыке.

Вспомним, например, великолепное описание утренней зари в „Песне о купце Калашникове“ М. Ю. Лермонтова, полное предчувствия трагического исхода дня. И когда читаешь строки „Песни“ Лермонтова, в памяти невольно начинают звучать волшебные звуки „Рассвета на Москве-реке“ М. П. Мусоргского.

Обратимся, однако, к описанию и объяснению явлений зари.

Опускаясь к горизонту, Солнце быстро теряет свою яркость и начинает менять свой цвет. Золотисто-желтый переходит в желтый, оранжевый, и у самого горизонта Солнце становится темно-красным. Одновременно окрашивается и западная часть небосвода у горизонта до высоты 8—12°. Когда Солнце находится уже близко к горизонту, небо вокруг него становится золотисто-желтым, ниже оранжевым и у самого горизонта красным или темно-красным. Это заря, или сияние зари в узком смысле этого слова.

Заря наиболее яркая сразу после захода Солнца. При большой прозрачности воздуха краски зари наиболее чистые в ее верхней части, где золотисто-желтый цвет переходит в зеленоватый и зеленый.

Пурпуровый свет

По мере погружения Солнца под горизонт часть небосвода, лежащая выше зари, быстро темнеет, окрашенная же часть (заря) принимает вид сегмента. Одновременно с этим над зарей на высоте около 25° появляется пятно сначала розового, а потом пурпурового цвета. Его форма приблизительно круглая или овальная. Это пурпуровый свет. Его верхний край находится на высоте 38—40° над горизонтом. Яркость и окраска пурпурового света достигают максимума при глубине погружения Солнца около 4°. Затем пурпуровое пятно быстро увеличивается в размере, опускается, превращаясь в дугу, и кажется, что дуга заходит за золотистый сегмент зари. К концу гражданских сумерек пурпуровый свет едва различим, сегмент зари суживается и также бледнеет.

Горение или пылание гор

Первоначально это явление было описано по наблюдениям в Альпах. Однако оно наблюдается в любых достаточно высоких горах, например на Кавказе, в Средней Азии. Наиболее красиво пылание меловых гор или гор, покрытых снегом. Заключается оно в следующем. При ясном небе и высоте Солнца около 2° над горизонтом вершины высоких гор окрашиваются в красный цвет. Окраска не очень интенсивная и сохраняется вплоть до захода Солнца. После захода Солнца пылание гор разгорается и достигает максимума при глубине погружения Солнца 1—2°. Характерно, что пылание начинается на несколько сотен метров ниже вершин гор и медленно поднимается вверх. Горы приобретают цвет докрасна раскаленного железа. Кажется, что горы „пылают огнем". Альпинисты, туристы и все, кому довелось видеть это явление, описывают его как нечто необычное, волшебное, величественное.

Иногда наблюдается вторичное пылание гор, более слабое, когда пурпуровый свет достигает максимума яркости. Если кому-то из читателей не довелось пока увидеть пылание гор в природе, рекомендую ему посмотреть картину А. И. Куинджи „Эльбрус вечером" и картины (или репродукции картин) Н. К. Рериха и С. Н. Рериха.

Окрашивание облаков аналогично окрашиванию гор во время сумерек. Начинается оно перед самым заходом Солнца. Сначала окрашиваются облака нижнего яруса, затем среднего и последними — верхнего. Светлые белые облака становятся сначала желтыми, потом оранжевыми и красными. Попадая в тень Земли, все облака гаснут, выглядят серыми, плохо различимыми.

Лучи Будды

Если за западным горизонтом на пути солнечных лучей есть высокие горы или плотные облака с просветами, типа кучево-дождевых, то тени от них в виде радиально расходящихся темных лучей ложатся на пурпуровое пятно и часто пересекают весь видимый небосвод. Веер чередующихся красных и темных лучей с центром в точке нахождения Солнца под горизонтом получил название лучей Будды. По внешнему виду и по происхождению лучи Будды похожи на лучи иззаоблачного сияния, наблюдающиеся днем. Лучи иззаоблачного сияния — это лучи в виде снопа или веера из чередующихся светлых и темных полос, которые пересекают весь небосклон. Это явление возникает, когда солнечный диск находится за облаками, а лучи Солнца, проникая в разрывы между ними и освещая на своем пути замутненный воздух, создают светлые полосы. Темные полосы при этом — тени от облаков.

Видели ли вы когда-нибудь тень Земли?

Человек, не подготовленный к такому вопросу, скорее всего, ответит отрицательно. Подумав, возможно, вспомнит, что тень Земли, закрывая лунный диск, вызывает лунные затмения. Однако лунные затмения редки. Тень же от Земли можно видеть дважды в сутки, если, конечно, на небе нет облаков.

Как только Солнце заходит за горизонт, на восточной стороне над горизонтом появляется пепельно-серого цвета сегмент. Это и есть тень Земли. Она окаймлена красной или розовой полосой, которую называют поясом Венеры. По мере погружения Солнца тень Земли поднимается все выше и выше, переходит через зенит и к концу гражданских сумерек закрывает значительную часть небосвода. Облака и пурпуровый свет угасают, оказавшись в тени Земли, пояс Венеры теряет свою окраску, постепенно бледнеет и сегмент зари. На небе появляются самые яркие звезды. Словом, все происходит так, как сказано у А. К. Толстого: „Запад гаснет в дали бледно-розовой, / Звезды небо усеяли чистое".

Где создается заря?

Почему заходы и восходы Солнца сопровождаются чарующей игрой красок на небосводе? В чем причина необычных багряных зорь?

Эти вопросы древние, как мир. Человек во все времена задумывался над ними. Не так просто дать исчерпывающие ответы на них и сегодня, хотя проделаны фундаментальные исследования процессов рассеяния света, протекающих во время сумерек.

Начнем с самого простого и наглядного. В месте захода Солнца его лучи идут параллельно плоскости горизонта. Ввиду резкого возрастания плотности воздуха в направлении земной поверхности световые лучи, проходящие на разных высотах над Землей, будут испытывать разное ослабление за счет рассеяния света. Луч, идущий ближе всего к Земле, проходит через самые плотные слои и будет ослаблен сильнее других. За счет рассеяния он потеряет значительную часть своих коротковолновых лучей и приобретет поэтому красную окраску. Луч, идущий выше него, будет ослаблен меньше и станет оранжевым, еще более высокий луч — желтым. Над ним выше пойдут малоослабленные белые солнечные лучи. Важно отметить, что, подойдя к месту захода Солнца, лучи уже приобрели разные цвета.

Окрашивание облаков перед заходом Солнца и сразу после него и изменение их цвета по мере опускания Солнца объясняется тем, что облака освещаются уже окрашенными лучами. Красная окраска гор перед самым заходом Солнца также обусловлена этим процессом.

Вернемся еще раз к рис. 13.1. Когда мы, находясь в точке A, смотрим снизу на терминатор и вдоль него в направлении падения лучей, то видим самые нижние лучи, окрашенные в пурпуровый цвет. Рассеяние пурпуровых лучей, без сомнения, играет важную роль в возникновении пурпурового пятна, окраске пояса Венеры и других зоревых явлений.

Из изложенного в предыдущей главе о сумеречном методе следует, что главную роль в рассеянии солнечного света в сумерки играют не приземные слои воздуха, а слой атмосферы, лежащий выше терминатора примерно на 20 км, т. е. в стратосфере. Исследования процессов рассеяния солнечного света во время сумерек с учетом многократного рассеяния привели Г. В. Розенберга к такому же выводу. *Главная „кухня" по формированию всех зоревых явлений находится в стратосфере* на высотах от 19—20 до 25 км. На этих высотах в стратосфере постоянно наблюдается относительно стабильный аэрозольный слой.

Заборы проб воздуха с этих высот с помощью самолетов и баллонов стратостатов, выполненные в 1958 г. Х. Юнге, показали, что аэрозоль в этом слое состоит в основном из капелек серной кислоты и ее солей. Этот слой назвали *слоем Юнге*.

Откуда же берется серная кислота и другие соединения серы на этих высотах в стратосфере? Как было установлено в дальнейшем, соединения серы не заносятся в этот слой воздушными потоками с Земли, а рождаются в нем в результате цепи химических реакций, в частности реакции сернистого газа с озоном. Сернистый газ выбрасывается в стратосферу при извержениях вулканов. Озона на этих высотах много. Как раз близко по высоте к аэрозольному слою лежит максимум концентрации озонного слоя (порядка 25 км), весь же озонный слой располагается на высотах от 10 до 50 км. Подавляющее большинство аэрозольных частиц этого слоя (99%) имеют размер от 0,1 до 1 мкм. Эта высокодисперсная, субмикронная фракция аэрозоля даже в разреженной стратосфере оседает и выпадает очень медленно. Время жизни частиц при средней концентрации может составлять несколько дней, недель, месяцев и более. Чем больше концентрация частиц, тем меньше время их жизни. Газовыделение вулканов с избытком обеспечивает обновление частиц этого слоя. В нормальном состоянии в этом аэрозольном слое содержится над всем земным шаром около 10 тыс. т аэрозоля.

Многие особенности обычных зорь — пурпуровый свет, пояс Венеры, пылание гор, как и „возмущенных“ зорь, т. е. зорь, появляющихся после извержений вулканов, Розенберг объясняет сложным процессом рассеяния, дифракции солнечных лучей в этом аэрозольном слое. Поэтому этот слой называют также *зоревым слоем*.

Багряные зори и другие световые явления, сопровождающие извержения вулканов

Самые красивые, самые яркие зори с интенсивным развитием пурпуровых тонов наблюдались во время и после сильных вулканических извержений взрывного типа. Такими были извержения вулканов Тамборы в 1815 г., Кракатау в 1883 г., Агунга в 1963 г. (в Индонезии), Эль-Чичона в 1982 г. (в Мексике), Мауна-Лоа в 1985 г. (на Гавайских островах) и другие.

Извержение вулкана Кракатау началось 27 августа 1883 г. Длительное время после извержения необычные оптические явления наблюдались только в тропической зоне, где произошло извержение. Затем вулканические облака были перенесены в Европу, и свидетелями аналогичных явлений с ноября 1883 г. стали жители Англии, а потом и других стран. Цвет Солнца при восходе и заходе был насыщенно-зеленым. По мере поднятия над горизонтом Солнце становилось ярко-голубым и только через некоторое время принимало свою обычную окраску. В сумерки над большими территориями появлялись серебристые облака. Зори были необыкновенно яркими с преобладанием пурпуровых тонов. Днем вокруг Солнца появлялись красно-коричневые венцы угловым радиусом около 22°, названные кольцами Бишопа.

В результате извержения Кракатау в атмосферу было выброшено примерно 20 км^3 пепла и пыли. При извержении Эль-Чичона в 1982 г., по

более надежно обоснованным оценкам, масса частиц, выброшенных в стратосферный слой, составила несколько миллионов тонн! Продукты извержения Эль-Чичона достигли высоты 35 км! Камни, пепел и крупные частицы быстро осели на землю. Основную же массу выброшенных частиц составили мелкодисперсные аэрозоли радиусом менее 1 мкм, которые наиболее активно рассеивают солнечную радиацию.

Помимо твердых частиц во время извержений вулканов в атмосферу выбрасывается огромное количество водяного пара и газов, в частности сернистого газа (SO_2). Сернистый газ, как уже говорилось, в результате окисления при определенной последовательности реакций превращается в серную кислоту. Капельки серной кислоты и мелкие частицы аэрозоля и образуют в стратосфере устойчивый аэрозольный слой Юнге.

Именно рассеяние и дифракция световых лучей в стратосферном аэрозольном слое является основной причиной возникновения необычайных багряных зорь и других световых явлений, сопровождающих вулканические извержения.

О предсказании погоды по заре

Многочисленные народные приметы погоды, связанные с видом зари, как правило, не оправдываются. Народные приметы вообще весьма противоречивы. Одни из них предсказывают при красной вечерней заре наступление ясной, вёдренной погоды, другие — дождя. В большинстве же примет красная заря означает переход от ясной погоды к ненастью. Таким образом, приметы охватывают все возможные изменения погоды при одной и той же красной заре. Поэтому какая-нибудь из примет всегда „оправдывается“.

Расскажем о попытке научного прогноза погоды по заре, которая осуществлялась в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова (ГГО) в 1939—1943 гг. Метод был разработан Н. И. Кучеровым. В практике анализа и прогноза погоды синоптики широко пользуются понятиями географической классификации воздушных масс. По этой классификации различают воздушные массы четырех широтных зон: арктический воздух, полярный (или умеренный) воздух, тропический воздух и экваториальный, в зависимости от положения очага формирования воздушных масс. Каждая масса характеризуется своими метеорологическими параметрами (температурой, влажностью, скоростью ветра, турбулентностью и т. д.), а также и своим характерным внешним видом зари. Например, в прозрачном более холодном арктическом воздухе все зоревые краски чистые и в верхней части сияния зари появляются зеленые тона. В более запыленном тропическом воздухе краски более тусклые, у земли вместо красного цвета — грязный красно-коричневый и т. д. Были созданы картинки внешнего вида сияния зари, типичные для каждой воздушной массы. Наблюдения заключались в следующем. С момента захода Солнца наблюдатель внимательно следил за внешним видом сияния зари и отмечал момент времени и азимут направления (по теодолиту), в котором внешний вид зари изменился, приобрел признаки, типичные для другой воздушной массы. Далее с помощью несложных астрономических расчетов на обычном бланке синоптической карты определялось то место, где произошла „смена“ воздушной массы и где, как предполагалось, проходил раздел воздушных

масс — атмосферный фронт. В трудные годы войны, когда синоптики не имели метеорологических данных из областей, лежащих западнее военных фронтов, считалось, что такие данные в известной мере могут помочь уточнить синоптическую обстановку за пределами фронта. Ведь „погода“ как известно, в силу вращения Земли, перемещается с запада на восток.

Автору книги довелось организовывать такие зоревые наблюдения и обучать им персонал метеорологической станции в Саратове. Аналогичные наблюдения одновременно проводились в Куйбышеве. Это было в августе и сентябре 1943 г. Дальнейшего развития зоревые наблюдения не получили.

Основная причина неудач как народных примет погоды по заре, так и попыток научного прогноза погоды по измерению красок зари, как мне представляется, заключается в следующем. И народные приметы и описанный способ прогноза погоды по заре, разрабатывавшийся в ГГО, базировались на предполагаемых связях внешнего вида зари и приземной погоды в области, лежащей западнее пункта наблюдения зари, т. е. той погоды, которая на следующий день или в следующие дни „придет“ в пункт наблюдения. А мы уже знаем, что главный „сценарий“ зоревых явлений создается в стратосфере, во всяком случае при формировании „возмущенных“ зорь. Хотя, конечно, на зоревые явления, уже сформированные процессами в стратосфере, мы смотрим через воздушную массу, которая находится у поверхности Земли и свойства приземной воздушной массы (она играет роль фильтра или стекла), разумеется, накладывают свой отпечаток на вид наблюдаемой зари.

Световые явления, связанные с падением Тунгусского метеорита

Скоро исполнится 80 лет „Тунгусскому чуду“, как привыкли называть необычное явление, которое произошло 30 июня 1908 г. в Центральной Сибири, в бассейне реки Подкаменной Тунгуски. Многочисленные жители селений в среднем течении Ангары, пассажиры Транссибирской железной дороги наблюдали, как в 7 часов утра по небу прокатился ослепительно яркий шар размером с Солнце и затем раздался взрыв. Взрыв сопровождался оглушительным ударом, световой вспышкой и землетрясением, которое зарегистрировали многие сейсмические станции мира.

О том, что же произошло в бассейне Подкаменной Тунгуски, был высказан ряд гипотез. Первая и основная гипотеза — падение огромного метеорита. Но многочисленные экспедиции в район катастрофы не обнаружили ни самого метеорита, ни каких-нибудь его осколков. Были гипотезы скорее фантастические, чем научные, например, падение на Землю корабля инопланетян или „черная дыра“, пронзившая Землю.

Второй научной гипотезой следует считать гипотезу столкновения Земли с кометой. Ядро кометы, имевшей, по-видимому, рыхлую структуру, например ледяную с примесью космической пыли, при взрыве могло полностью испариться, превратившись в высокодисперсную фракцию. Продукты взрыва были выброшены в стратосферу. В пользу гипотезы столкновения с кометой говорят необычные световые явления, которые наблюдались на большой теоритории после „Тунгусского чуда“. Вот эти явления.

С 30 июня по 3—4 июля на огромной теоритории — по всей Западной Сибири, европейской части России, почти по всей Западной Европе ночи были поразительно светлыми. Они были светлее наших ленинградских белых ночей. Практически ночи отсутствовали, поскольку было настолько светло, что можно было читать любой мелкий шрифт. И такие светлые ночи в ослабленном виде наблюдались на протяжении всего июля, и даже в августе ночи были светлее, чем обычно в это время года в этих широтах.

Другое явление — необыкновенно красочные зори. Небосвод полыхал и расцветал всеми возможными красками зари.

Третье явление — на всей указанной территории появились в большом количестве серебристые облака. Наблюдение серебристых облаков на столь огромной территории и почти ежедневно, а точнее каждые сумерки, явление чрезвычайно редкое.

В пользу гипотезы столкновения с кометой, с моей точки зрения, говорят необычайно светлые ночи сразу после взрыва и на протяжении последующего месяца, обусловленные прохождением хвоста кометы через земную атмосферу. Хвосты комет, как известно, тянутся за ядром на многие миллионы километров. Итак, можно предположить, что в результате взрыва ядра кометы и пересечения земной атмосферы хвостом кометы в стратосфере оказалось огромное количество высокодисперсного аэрозоля. Рассеяние солнечного света на этих аэрозольных частицах и породило перечисленные световые явления. Окончательно еще не установлено, что же произошло в районе Подкаменной Тунгуски. Поэтому исследования этого явления продолжаются.

15. Свечение ночного неба

Сомнений полон ваш ответ
О том, что окрест ближних мест.
Скажите ж, коль пространен свет?
И что малейших дале звезд?

М. В. Ломоносов

Освещенность лунным светом

В ночные часы земная поверхность освещается рядом источников. Среди них самым сильным, посылающим больше всего света на Землю является Луна. В безлунные ночи земная поверхность получает свет, исходящий от ночного неба. Общий свет, поступающий от всех источников в отсутствие Луны, называют *свечением ночного неба*.

Рассмотрим освещенность Земли в лунные ночи. По аналогии со световой солнечной постоянной применяют понятие *световой лунной постоянной*. Это освещенность, создаваемая полной Луной на перпендикулярной к лучам площадке, расположенной на внешней границе атмосферы. Она равна 0,34 лк. Световую лунную постоянную можно также назвать *заатмосферной лунной освещенностью*.

Максимальная освещенность, которую полная Луна, находящаяся в зените, создает на земной поверхности при средней прозрачности атмосферы составляет около 0,25 лк. Обычно освещенность лунным светом, если Луна не в зените, не превышает 0,1 лк, а в первой и последней четвертях составляет только 0,03—0,04 лк. Освещенность, создаваемая „молодой" Луной, больше, чем освещенность, создаваемая „старой", примерно на 20%, что обусловлено неравномерным распределением пятен по лунной поверхности.

Яркость лунного диска создается отраженным солнечным светом, что образно выразил Хафиз: „О Луна! Ты у Солнца взяла свой блеск и свет". Только „взяла" Луна мало, ничтожно мало! Лунная освещенность едва достигает 0,0002—0,0003% солнечной.

Только представьте себе — всего несколько десятитысячных долей процента солнечной! А ведь и в лунную ночь кажется светло, как будто все вокруг достаточно хорошо освещено. „Волшебником", который создает эту иллюзию света, является наш глаз с его удивительной способностью адаптации на низкие уровни освещения!

Ночью мы не просто „довольствуемся" лунным светом, поскольку нет солнечного. Нет, человеку, глаз которого полностью адаптировался на лунный уровень освещения, действительно все представляется хорошо освещенным. Мы любуемся ландшафтом, залитым лунным светом! И здесь невольно вспоминается афоризм Козьмы Пруткова: „Если у тебя спрошено будет: что полезнее, солнце или месяц? — ответствуй: месяц. Ибо солнце светит днем, когда и без того светло; а месяц ночью".

Звездный свет

Вряд ли найдется человек, который не любовался бы красотой ночного неба, усеянного звездами. Глядя на звезды, невольно проникаешься чувством восхищения перед величием мира и, даже в наш космический век, ощущаешь что-то таинственное, неизвестное, лежащее в необъятных просторах Вселенной.

Давайте, читатель, совершим вместе прогулку под ночным звездным небом и рассмотрим другие источники освещения земной поверхности в ночное время. В самые первые минуты, когда мы только покинули освещенное помещение, мы видим лишь самые яркие звезды. Постепенно, по мере того как глаз привыкает к темноте, начинаем различать и более слабые звезды. Проходит еще несколько минут, и звезд мы видим все больше и больше. Нам, как в свое время великому М. В. Ломоносову, открывается „... бездна звезд полна; / Звездам числа нет, бездне дна!" А тем временем строения и другие предметы, окружающие нас на Земле, которые мы воспринимали сначала в виде едва различимых силуэтов, становятся видны уже довольно отчетливо.

Задумывались ли вы, читатель, чем освещены все наземные предметы в безлунную ночь? Ну, конечно же, звездами! Это первое, что приходит на ум любому человеку. И действительно, в ясную, достаточно темную ночь на небе светит множество звезд, и звезды так далеки, так недоступны, кажется, что нет никакой возможности не только что-либо узнать об их природе, но просто сосчитать их!

В литературе часто употребляется выражение „мириады звезд“. Однако „мириады“ — преувеличение. В действительности оказывается, что даже при самой большой прозрачности атмосферы в темную ночь невооруженным глазом можно увидеть и различить на половине небосвода, доступной наблюдению (другая находится за горизонтом), около 2000 звезд. Близко расположенные звезды мы мысленно объединяем в созвездия. В расположении отдельных групп звезд человек с древнейших времен искал и угадывал знакомые ему очертания людей, животных, предметов. Так возникли названия созвездий: Большая Медведица, Геркулес, Кит и другие. На всем небосводе 88 созвездий. В средних широтах одновременно можно видеть не более 20.

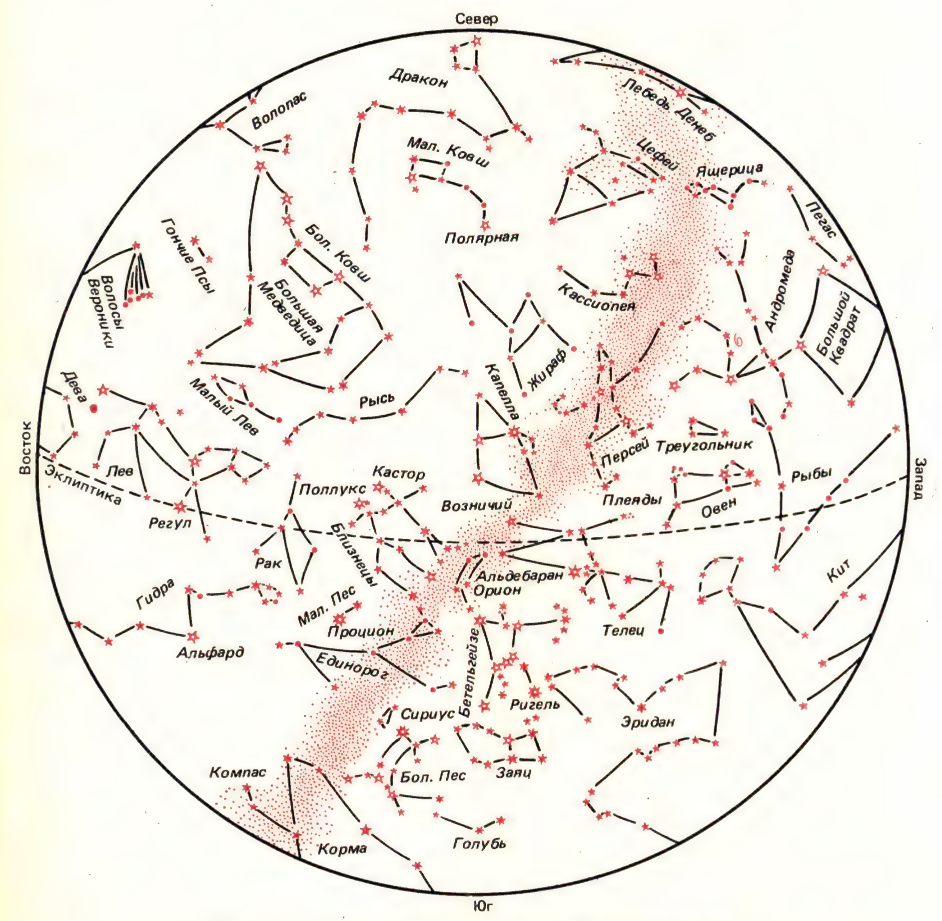


Рис. 15.1. Созвездия зимнего неба на широте 40° С
Из книги Г. Рея „Звезды“.

На рис. 15.1 представлены созвездия зимнего неба, видные на широте 40° с., изображенные американским ученым Г. Реем.* Рей остроумно и изобретательно придал старым созвездиям новые очертания, соединив звездочки прямыми линиями так, что получились узнаваемые очертания животных и людей, вместо непонятных геометрических фигур, какими они изображались при случайном соединении линиями тех же самых звезд.

Действительное годовое движение Земли вокруг Солнца относительно неподвижного небосвода приводит к тому, что наблюдатель на Земле видит Солнце на фоне разных созвездий. Пояс на небесной сфере, вдоль которого осуществляется видимое годовое движение Солнца, называется поясом Зодиака (рис. 15.2), а линия видимого годового пути Солнца называется эклиптикой. „Зодиак“ по-гречески означает „звериный круг“. В него входят 12 зодиакальных созвездий. В древние времени (более 4000 лет назад) все зодиакальные созвездия имели названия животных.

В ясные безлунные ночи на небосводе видно скопление звезд в виде светлой полосы с неровными краями, будто разлитое по темному небу молоко. Это Млечный Путь или наша Галактика. „Галактика“ в переводе с греческого тоже означает „молочный“. На рис. 15.2 Млечный Путь изображен изогнутой полосой, состоящей из огромного количества звездочек. В области Млечного Пути находится подавляющее большинство ярких звезд.

Расстояния до звезд и других далеких объектов Вселенной настолько велики, что их неудобно измерять даже в миллионах километров. Пришлось бы писать очень много нулей. Поэтому применяют специальную единицу длины, своеобразный „космический метр“, называемый световым годом.

Световой год — это расстояние, которое свет проходит за год, двигаясь со скоростью 300 000 км/с. Он составляет около 10 тыс. млрд. км, т. е. 10^{12} км. Свет от Солнца доходит до Земли за 8,5 мин. Свет от ближайшей к нам звезды Альфа Центавра (на небе южного полушария) — за 4,3 световых года, от Сириуса — за 8 световых лет, от Проциона за 12. Подавляющее большинство звезд находятся от Земли и друг от друга на значительно бóльших расстояниях.

Подсчет общего числа звезд, видимых в телескопы, и составление звездных каталогов оказалось невероятно трудной задачей, так как чем сильнее телескоп, тем большее число слабых звезд в нем видно. Первая попытка подсчитать общее количество звезд была осуществлена еще в конце XVIII в. В. Гершелем. В 50—60-е годы нашего века работы по подсчетам числа звезд были завершены со всей возможной тщательностью на современных телескопах голландцем Б. Я. Боком и его учениками в Гарвардском университете (США).

Первые попытки оценить участие всех звезд в освещении земной поверхности ночью были сделаны еще в 1901 г. американским астрономом Ньюкомбом. Они привели его к странному результату. У него получилось, что все звезды вместе взятые не могут создать и половины освещенности, наблюдаемой на Земле в безлунную ночь. Подсчетами освещенности, создаваемой звездами, занимались и после Ньюкомба, но почти во всех случаях оказывалось, что света звезд явно недостаточно. Было высказано

* Рей Г. Звезды. М., „Мир“, 1969.

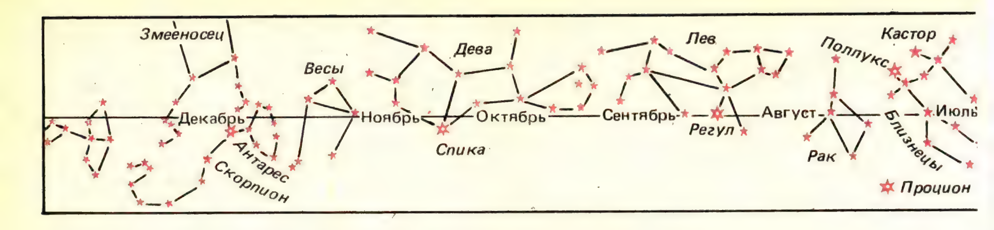


Рис. 15.2. Годовое движение Солнца по 12 созвездиям Зодиака.

предположение, что имеется много слабых звезд, недоступных нашему наблюдению, но посылающих свой свет на Землю. Однако дальнейшие исследования опровергли это предположение. По мере совершенствования телескопов уточнялись и наши представления о количестве звезд каждой звездной величины* и об их блеске.

Сколько же звезд на небе?

Невооруженным глазом высоко в горах можно увидеть звезды до 6-й звездной величины, на уровне моря — до 5-й, а в современные телескопы — до величины 18,8. На всем небосводе насчитывается звезд: ярче 5-й величины — 1620, ярче 6-й — 4850 и ярче 18,8 — $5 \cdot 10^8$. Это, на первый взгляд, невероятно большое количество — полмиллиарда, как теперь установили астрофизики, составляет менее 2% от общего числа звезд, находящихся в нашей Галактике! Полное количество звезд в Галактике оценивается в $3 \cdot 10^{10}$. Участие самых ярких звезд 1-й и 2-й величин в освещении Земли составляет менее 1% (рис. 15.3). Поэтому яркие звезды не мешают фотографированию ночного неба. При длительной многочасовой экспозиции они не засвечивают всей пластинки. Их следы на пластинке имеют вид тонких светлых линий. Если бы вдруг все яркие звезды погасли, мы бы даже и не заметили, что стало темнее. Звезд больших звездных величин много, но они находятся далеко от нас и с увеличением номера звездной величины уменьшается их роль в освещении Земли. Вот и возникает некоторый пара-

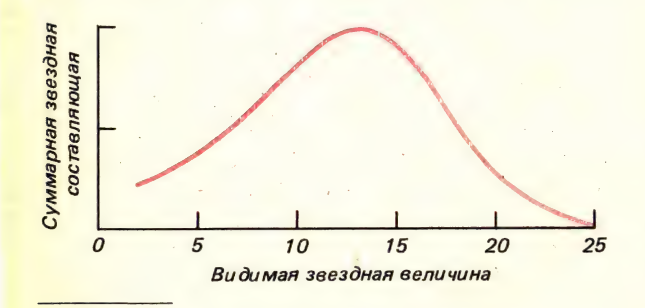
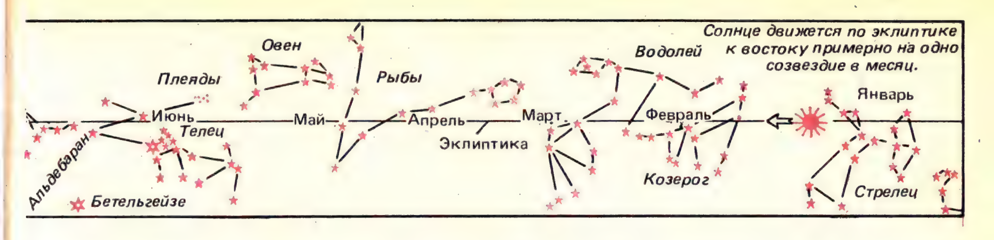


Рис. 15.3. Участие звезд различных видимых звездных величин в освещении земной поверхности ночью (для области Млечного Пути).
Составлено по звездному каталогу обсерватории Маунт-Вилсон (США).

* Звездная величина — мера, характеризующая блеск звезд. Блеск звезды — величина, характеризующая освещенность, которую звезда создает на внешней границе атмосферы. Переход от одной звездной величины к следующей по номеру соответствует изменению блеска в 2,5 раза.



Направление движения показано стрелкой.

докс! *Из всех звезд основную освещенность на Земле создают звезды 10-й —15-й величины, не видимые глазом!*

Средняя поверхностная яркость звездного неба, которая получилась бы, если все звезды „размазать“ по небу равномерно, составляет $5 \cdot 10^{-14}$ яркости Солнца. Но звезды распределены по небу неравномерно, большая их часть находится в области Млечного Пути. Поэтому яркость неба в Млечном Пути примерно в 9 раз больше, чем у галактического полюса. Роль же планет в освещении земной поверхности ничтожно мала.

Атмосфера освещает Землю?

Если звезды обеспечивают менее половины наблюдаемой освещенности, то невольно встает вопрос, какой же источник создает остальную освещенность земной поверхности в безлунную ночь? Открытие этого источника имеет свою интересную историю.

В том же 1901 г., когда Ньюкомб делал первые звездные подсчеты, немецкий ученый Вихерт в Геттингене, фотографируя спектр ночного неба, обнаружил на пластинках зеленую линию, самую характерную в спектрах полярных сияний, при этом во многих частях неба. Вихерт не оценил должным образом свое открытие и ограничился замечанием, что полярные сияния на широте Геттингена (51°35′) — явление не такое редкое, как это считали раньше.

Еще ближе к открытию подошел голландский ученый Интема. В 1909 г. он, как и Ньюкомб, подсчитав свет от всех звезд, убедился еще раз, что света только одних звезд для создания наблюдаемой на Земле освещенности явно недостаточно. Учитывая исследования Вихерта, он высказал гипотезу, что непрерывный зеленый свет посылает источник, находящийся в земной атмосфере.

Подтвердить справедливость гипотезы Интема и сделать окончательное открытие важного источника освещения земной поверхности ночью удалось только через 10 лет, в 1919 г., английскому астроному Слайферу. Еще в 1915 г., фотографируя спектр Млечного Пути несколько ночей подряд, Слайфер обнаружил на всех пластинках зеленую линию, типичную для полярных сияний. Но свои измерения он проводил на широте 35°12′, где полярные сияния наблюдаются крайне редко — в среднем один раз за много лет. Слайфер продолжал свои наблюдения еще четыре года, сделал множество снимков во всех частях неба и всюду находил зеленую линию. Яркость линии была тем больше, чем ближе к горизонту производилось

фотографирование. Оставалось сделать вывод, что весь небосвод каждую ночь излучает непрерывный свет, подобный свету полярных сияний. Так было открыто *ночное свечение атмосферы!*

Какую большую роль играет атмосфера в жизни человечества, известно каждому школьнику. Прежде всего, мы дышим воздухом, без него невозможна была бы жизнь на Земле. Атмосфера „согревает" Землю, поглощая тепло, излучаемое Землей в мировое пространство, и частично возвращая его в виде встречного излучения атмосферы. Атмосфера выполняет ряд защитных функций. Она защищает нас от губительного действия ультрафиолетовых лучей Солнца и от „небесных камней" — метеоров, подавляющая масса которых, сгорает в атмосфере. Ионизированные слои, имеющиеся в атмосфере, обеспечивают радиосвязь и отражают назад в мировое пространство приходящие из него радиоволны длиннее 30 м днем и 200—300 м ночью, освобождая от них наш эфир. Обо всех перечисленных „функциях" атмосферы часто пишут и говорят. Но то, что атмосфера еще и освещает Землю ночью, что в отсутствие Луны она наш главный светильник, знают не все.

Открытие ночного свечения атмосферы явилось подлинной сенсацией в науке. Сразу же возникла масса вопросов. Вся ли атмосфера светится или какой-то ее слой? Если слой, то на какой высоте? Почему воздух светится ночью? И ряд других вопросов. Сначала расскажем о том, чем создается свечение.

Ночное свечение атмосферы представляет собой свечение разреженных газов (люминесценцию), составляющих воздух на высотах от 80 до 300 км. По физической природе оно аналогично свечению разреженных газов в газосветных рекламных трубках (красный свет — это свечение неона, зеленый — паров ртури и т. д.). Спектр свечения атмосферы является довольно сложным. Он состоит из большого числа линий и полос в видимой, инфракрасной и ультрафиолетовой областях спектра, а также слабого непрерывного участка спектра, называемого континуумом, в области длин волн 0,595—0,630 мкм.

В видимой части спектра самыми яркими линиями являются линии излучения атомарного кислорода. Это, прежде всего, знаменитая зеленая линия, благодаря которой и открыли свечение атмосферы. Зеленая линия (длина волны 0,5577 мкм) постоянно присутствует и в спектрах полярных сияний, придавая им зеленоватую окраску. Две более слабые линии атомарного кислорода имеются в красной части спектра (0,6300 и 0,6364 мкм), есть яркая оранжевая линия атома натрия (0,6300 мкм), вспышку которой обнаружили сначала в свечении сумеречного неба, имеются полосы гидроксила, континуум и др. Наибольшей интенсивностью характеризуются полосы и линии излучения в близкой ИК-области. Это очень сильная сложной структуры полоса гидроксила (3,817—4,470 мкм), полосы молекулярного азота, двуокиси азота, атомарного натрия и ряда других газов, входящих в состав воздуха.

Излучение гидроксила настолько сильное (несмотря на его ничтожно малую концентрацию в сравнении с основными газами), что если бы оно происходило в видимой части спектра, то яркость ночного свечения увеличилась бы до яркости неба при сильном полярном сиянии или достигла бы яркости неба в середине сумерек. Таким образом, ночь в обычном понимании этого слова не наступала бы вообще.

Каждый газ имеет один или несколько максимумов свечения на характерных для него высотах. Полосы излучения гидроксила вносят наибольший вклад в общую энергию свечения атмосферы. Вместе с континуумом они создают около 87% общего свечения и имеют два максимума на высотах 80—86 и 100—105 км. Зеленая линия атомарного кислорода светится в тонком слое 80—100 км. Ее вклад составляет около 10%. Красные линии атомарного кислорода имеют максимум свечения на высотах 200—300 км, их вклад менее 1%, линия натрия — на высоте 82—96 км, ее вклад около 1%. На долю свечения остальных газов приходится примерно 1% общей энергии.

Почему воздух светится ночью?

Рассмотрим происхождение ночного свечения атмосферы и попробуем объяснить, что заставляет воздух светиться ночью. Почему светится не вся атмосфера, а только ее сравнительно тонкий слой? Светится ли воздух в другое время суток? Чтобы ответить на эти вопросы, приведем некоторые, самые общие сведения о состоянии воздуха на высотах свечения.

Как известно, плотность воздуха и его давление очень быстро уменьшаются по мере поднятия над земной поверхностью. Среднее давление воздуха в стандартной атмосфере у поверхности Земли на уровне моря равно 1013 гПа, на высоте около 5 км оно уменьшается вдвое, а на высоте 100 км давление измеряется уже десятитысячными долями гектопаскаля. Число молекул в единице объема воздуха на высоте 100 км меньше, чем у поверхности Земли, примерно в 3 млн. раз. Состав воздуха, такой, какой мы имеем у поверхности Земли, сохраняется неизменным только до высот порядка 80—100 км. В более высоких слоях под влиянием коротковолнового солнечного излучения происходит расщепление, или, как говорят, диссоциация молекул газов на атомы.

Чтобы разбить любую молекулу на атомы, надо затратить некоторую энергию, называемую работой диссоциации. Величина работы диссоциации зависит от строения молекулы. Энергией, достаточной для диссоциации молекул воздуха, обладают кванты ультрафиолетового излучения Солнца с длинами волн короче 0,175 мкм. Из основных газов атмосферы легче всего диссоциируется кислород.

В дневные часы, при освещении атмосферы солнечными лучами, происходит реакция диссоциации молекул кислорода:

$$O_2 + h\nu \to O + O. \qquad (15.1)$$

Максимальная концентрация атомов кислорода создается на высотах 80—100 км. Диссоциация молекул азота происходит на больших высотах. При наступлении сумерек и ночи процесс диссоциации молекул прекращается и начинает преобладать процесс соединения атомов в молекулы. Эта реакция идет с выделением некоторого количества энергии u.

Установлено, что при столкновении друг с другом атомы кислорода практически не соединяются в молекулу. Воссоединение атомов происходит главным образом при так называемых тройных ударах, когда одновременно встречаются два атома кислорода с какой-то третьей частицей, назовем ее M:

$$O + O + M \to O_2 + M + u. \qquad (15.2)$$

Выделяемая энергия $u = 5{,}17$ эВ расходуется на возбуждение свечения третьей частицы М. Такой частицей может быть любой атом или молекула, линии и полосы свечения которых наблюдаются в спектрах ночного свечения атмосферы, например O, O_2, N_2, NO_2 и другие, а также в небольшом количестве ионы атомов и молекул, имеющиеся на этих высотах. Излучение гидроксила (OH) и двуокиси азота (NO_2) возникает при реакциях, сопровождающих двойные удары. Вероятность двойных ударов значительно больше, чем тройных, ввиду малой плотности воздуха на указанных высотах:

$$H + O_3 \rightarrow OH + O_2 + 3{,}4 \text{ эВ}, \quad (15.3)$$

$$O + NO \rightarrow NO_2 + 3{,}1 \text{ эВ}. \quad (15.4)$$

Основные реакции, приводящие к свечению перечисленных газов, происходят главным образом на высотах 80—100 км. Поэтому этот слой часто называют химической лабораторией атмосферы.

Солнечные лучи пронизывают всю атмосферу, почему же свечение возникает только в определенном ее слое? Объясняется это тем, что яркость свечения будет тем больше, чем больше плотность воздуха и чем больше интенсивность ультрафиолетового излучения Солнца. Оба эти фактора, определяющие свечение воздуха, изменяются очень быстро и как раз в противоположных направлениях. Плотность воздуха с высотой убывает, а плотность ультрафиолетового потока от Солнца — возрастает. Поэтому на некоторой высоте, в каком-то довольно тонком слое, создаются наиболее благоприятные (оптимальные) условия, когда еще достаточны и плотность воздуха и интенсивность излучения. Ввиду того что у каждого газа своя величина работы диссоциации, максимумы диссоциации и свечения у разных газов возникают на разных высотах. На высотах 250—300 км, где находится максимум концентрации электронов и ионов в ионосфере, реакция происходит с участием положительно заряженных ионов атомов кислорода (O^+), молекул кислорода (O_2^+), окиси азота (NO^+) и других ионов.

Яркость отдельных линий и полос в спектре ночного неба, а также общая яркость неба могут значительно изменяться как в течение одной ночи, так и от ночи к ночи. Интенсивность многих линий, например обеих красных линий атомарного кислорода, увеличивается в несколько раз, достигая максимума в 1—2 часа ночи.

Наблюдения с космических кораблей

Можно ли увидеть свет, испускаемый атмосферой? С поверхности Земли этот свет простым глазом невозможно отделить от рассеянного света, посылаемого другими источниками. С помощью спектрографов с Земли фотографировали спектры свечения атмосферы и измеряли длины волн, устанавливали, какими газами они излучаются и в каком состоянии эти газы находятся (температура, степень диссоциации и другое).

С космических кораблей, когда они находятся на ночных частях витков, ночное свечение атмосферы всегда хорошо видно в виде тонкого светящегося пояса или венца, окружающего ночной горизонт Земли. При этом космонавт имеет возможность смотреть вдоль светящегося слоя, что увеличивает эффективную толщину светящегося слоя, расположенного на высоте 100 км, почти в 30 раз по сравнению с тем, какой она представляется наблюдателю с Земли.

В общем светящемся слое можно рассмотреть два пояса. Первый — более яркий и однородный светящийся пояс серо-голубого цвета, угловой радиус которого составляет около 1,5°. Такая угловая ширина соответствует высотам светящегося слоя атмосферы 80—100 км при наблюдении с космического корабля, находящегося на высоте 500 км. Над первым поясом наблюдается более слабый второй пояс свечения на высотах 170—300 км. В экваториальной области этот пояс приобретает характерную вертикально-лучевую структуру (см. рис. 13.2).

Много интересных сведений о характере изменения свечения ночной атмосферы над большими территориями земной поверхности получено с помощью фотометрических измерений с пилотируемых космических кораблей, ракет и спутников. Спутник или корабль, виток за витком облетая земной шар, имеет возможность фотографировать состояние атмосферы над обширными районами. Так были обнаружены зоны повышенной интенсивности свечения красных линий кислорода в тропиках на расстояниях около 20° по обе стороны от геомагнитного экватора. Эти области свечения были названы *тропическими красными дугами*. Позднее аналогичного характера свечение было обнаружено и в средних широтах вдоль 50—55° геомагнитных широт *(среднеширотные красные дуги)*.

Установлено, что усиление свечения красных линий в спектре ночного неба связано с увеличением концентрации ионизированных атомов и молекул в ионосфере. На основе измерений со спутников строятся, аналогично синоптическим картам, карты ночного свечения атмосферы. С помощью таких карт исследуется состояние ионосферы над большими областями земной поверхности. По наблюдениям с космических кораблей были обнаружены излучения атомарного водорода в видимой и ультрафиолетовой областях, а также излучения ионизированного гелия в УФ- и ИК-областях на высотах более 1000 км.

Космонавт Алексей Леонов, первый совершивший выход в открытый космос 18 марта 1965 г. с корабля „Восход-2", увидел нашу планету со стороны, с большой высоты, когда площадь обзора не была ограничена рамками иллюминатора. Это произошло около 11 часов утра над Черным морем. В обозреваемую площадь земной поверхности вместилось все Черное море от берега до берега, угадывались знакомые очертания береговой линии Крыма, Кавказа, видны были горы Кавказа, облака и даже тени от них на Земле. Вся земная поверхность была окутана нежнейшей голубой вуалью рассеянного атмосферой солнечного света. С дневной стороны наша Земля выглядела голубой планетой. Наиболее интенсивной дымка была по горизонту, и поэтому казалось, что Земля опоясана голубым поясом.

Первые наброски рисунков вида Земли из космоса А. А. Леонов сделал на полях бортового журнала. По возвращении на Землю он написал картину „Голубой пояс Земли". Позднее, основываясь на своих космических впечатлениях, А. А. Леонов написал серию картин: „Голубая Земля", „Утро в космосе", „Космическая заря", „Восход Солнца в космосе", „Космический вечер" и другие. На этих полотнах запечатлены необыкновенно яркие радужные ореолы вечерних и утренних сумерек в космосе, цветное кольцо свечения атмосферы на ночном горизонте, голубой ореол, окутывающий дневную половину земной поверхности.

Аналогичными картинами вида Земли из космоса любовались и другие космонавты.

10 Зак. 809

Полярные сияния

Полярные сияния, пожалуй, самое красивое, самое красочное световое явление в природе. Чарующая игра цвета и света, меняющаяся на глазах картина свечения производит неотразимое впечатление.

О полярных сияниях написано много и научных и научно-популярных книг. На русском Севере полярные сияния называли пазорями или сполохами. Пазорями, по-видимому, за сходство по окраске с зорями. Сполохами от слова сполошить — тревожить, беспокоить, поднимать тревогу. Такое название обусловлено тем, что во время полярных сияний небо бывает красным, как при пожаре. Недаром Ломоносов образно назвал полярное сияние „пожаром небес". Случалось, и не однократно, что полярное сияние красного цвета принимали за зарево пожара в северной части горизонта и пожарные команды выезжали „на пожар". Такое имело место в нескольких южноевропейских городах 25 января 1938 г. Бывало и раньше при сильных полярных сияниях.

Формы сияний разнообразны. Они могут быть неподвижными в виде диффузного свечения неба либо пульсирующей по яркости дуги, ленты или поверхности. Подвижные сияния более красивы: часто они имеют вид складок гигантского занавеса (драпри), одиночных лучей или связанных в пучки, встречается коронообразная форма и другие.

Длительное время полярные сияния наблюдали только ночью; позднее было показано, что их можно видеть и днем. Ночные и дневные сияния вместе образуют замкнутую овальную полосу вокруг магнитных полюсов Земли. Их называют *авроральными овалами*. На ночной половине Земли ширина овальной полосы от 60,5 до 75,5° магнитной широты, а на дневной она смещена ближе к полюсам и занимает область 74,5—69,5° магнитных широт (рис. 15.4).

Полярное сияние — явление, родственное ночному свечению атмосферы. Это также свечение разреженного воздуха на высотах от 80—100 км и чаще всего до 400 км. Иногда полярные сияния достигают больших высот: 1000—1100 км.

Спектры полярных сияний имеют сходство со спектрами ночного свечения атмосферы, так как в обоих случаях светятся в основном одни и те же

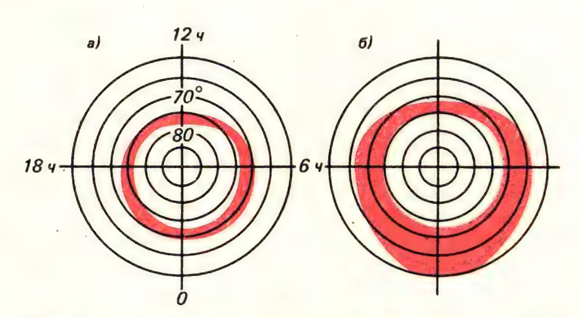


Рис. 15.4. Положение аврорального овала при магнитных бурях разной интенсивности: *а* — при слабой, *б* — при сильной.

газы, составляющие воздух. Но между ними есть и много различий в спектрах, поскольку у них различаются механизмы возбуждения свечения и высоты светящихся слоев.

Причиной полярных сияний являются корпускулярные потоки протонов и электронов, вторгающиеся в атмосферу Земли, главным образом от Солнца. Эти непрерывно идущие от Солнца потоки заряженных частиц называют *солнечным ветром*. Энергия протонов солнечного ветра составляет несколько сотен электронвольт, а электронов —20—30 тыс. эВ. Плотность электронных потоков при умеренных по интенсивности сияниях составляет около 10^9 см$^{-2}$с$^{-1}$, достигая при ярких сияниях 10^{11} см$^{-2}$с$^{-1}$. Плотность протонного потока обычно не более $3 \cdot 10^8$ см$^{-2}$с$^{-1}$. Поясним эти цифры. Во время полярного сияния на тех высотах, где происходит свечение, через площадку в 1 см^2 каждую секунду проскакивает (или ее ударяет) 10^9 электронов и $3 \cdot 10^8$ протонов, т. е. миллиарды электронов и сотни миллионов протонов. Вот вам и космос, вот и вакуум!

Солнечный ветер — это, по существу, поток солнечной плазмы из постоянно расширяющегося наружного слоя самого Солнца — солнечной короны. Потоки заряженных частиц из солнечной короны пронизывают все околосолнечное пространство, они непрерывно обдувают и нашу Землю.

Потоки солнечного ветра, вторгаясь в верхние слои земной атмосферы, деформируют магнитное поле Земли, нарушая его нормальное состояние. На дневной стороне магнитные силовые линии сгущаются, сжимаются, а на ночной — вытягиваются на миллионы километров, создавая огромный шлейф. Магнитосфера Земли становится похожей на комету с длинным-длинным хвостом. Поэтому полярные сияния всегда сопровождаются магнитными бурями и нарушением состояния верхних ионизированных слоев атмосферы — ее магнитосферы.

С земной поверхности производят фотографирование спектров полярных сияний с последующей их расшифровкой, т. е. установлением, какие линии и полосы в спектре каким газам принадлежат и какова их относительная интенсивность. Специальным фотоаппаратом — камерой всего неба — через короткие интервалы времени (1 мин) автоматически фотографируют положение и площадь, занимаемую полярным сиянием на небосводе. Используют также сканирующие фотометры, перемещающиеся по небосводу и измеряющие яркость сияния по участкам.

Полярное сияние кажется ярким. В действительности, даже при самом сильном полярном сиянии сквозь него всегда видны звезды. А его кажущаяся большая яркость является результатом хорошей адаптации глаза на низкий уровень освещения.

Освещенность при интенсивных полярных сияниях может достичь самое большее лунной освещенности, т. е. порядка 0,1—0,2 лк.

Полярные сияния из космоса

С поверхности Земли полярные сияния чаще всего можно наблюдать в высоких, иногда в средних широтах ночью при отсутствии облаков. Из космоса полярные сияния видны всегда и при том одновременно над большими территориями.

Наблюдения из космоса принесли богатую информацию о пространственном расположении сияний, их повторяемости в разное время суток, о многих особенностях этого свечения атмосферы. Появилась возможность наблюдать полярные сияния без ослабляющего и искажающего влияния нижних плотных слоев атмосферы.

Наблюдения с пилотируемых космических кораблей и орбитальных станций не только приблизили наблюдателя к областям свечения, они позволили наблюдать и делать измерения внутри самого полярного сияния, пролетать через полярное сияние. Приведем отрывок из записи в бортжурнале „Салюта-6“, сделанной В. В. Коваленком во время очень интенсивного полярного сияния 11 и 12 апреля 1981 г. Космонавты наблюдали сияние в южном полушарии на ночных участках орбиты станции. В эти дни была отмечена сильная магнитная буря, которая и сопровождалась яркими, цветными полярными сияниями. Итак, запись В. В. Коваленка.

11 апреля 1981 г. Виток 350. 15 ч 25 мин. „Вошли в полярное сияние. Идем в полярном сиянии. Слева по курсу оно имеет красный цвет. В 15 ч 25 мин 30 с наблюдается несколько столбов. Красный цвет достигает Скорпиона (хвоста)... Идем как в облачности, как в тумане. Сейчас над нами массивные полосы... Красные лучи доходят до Ориона, выше они приобретают голубоватый оттенок, а слева от станции — красно-оранжевый цвет. Летим в них.“ И далее: „На фоне Земли видна лучистая структура каждой дуги полярного сияния“.

12 апреля 1981 г., виток 364. „Очень много голубого цвета. Видим голубые лучи. Вот взметнулся голубой столб, вот взметнулся красный. По высоте голубые столбы 15°. Это в районе захода Сириуса. Есть и голубовато-зеленый столб, он по горизонту примерно 4°. Игра красок: слева от Канопуса красный столб, зеленовато-голубое свечение, справа от него в направлении на Южный Крест — голубой столб. Очень редкое явление в полярных сияниях.“

Из космоса постоянно видны авроральные овалы и в северном и в южном полушариях. Время от времени вспыхивают полярные сияния, захватывающие часть или все пространство между авроральными овалами и магнитными полюсами. Их называют *сияниями полярных шапок*. В средних широтах полярные сияния видны в виде стабильных красных дуг вдоль геомагнитных широт 50—60° на высотах 300—600 км.

На дневной стороне Земли полярные сияния также видны в виде авроральных овалов, но, как уже говорилось выше, сдвинутых к 75° геомагнитной широты. Днем видны и стабильные красные дуги.

Искусственные полярные сияния

Полярные сияния можно вызвать искусственно. В 1975 г. начался советско-французский эксперимент „Аракс“. Были выбраны две магнитно-сопряженные точки на поверхности земного шара (так называют точки, лежащие на одной и той же магнитной силовой линии): одна в северном полушарии — поселок Согра в Архангельской области, другая в южном — французский остров Кергелен в Индийском океане. С острова Кергелен на геофизической ракете подняли небольшой ускоритель частиц — электронную пушку, которая на определенной высоте выбросила поток электро-

нов. Распространяясь вдоль магнитной силовой линии, удаляющейся от земной поверхности над экватором более чем на 20 000 км, электроны попали в северное полушарие и вызвали полярное сияние над Согрой. При наличии облаков, не позволяющих визуальное наблюдение сияний, последние регистрировались радарными установками. Название эксперимента „Аракс" составлено из начальных букв французских слов, которые означают „искусственное полярное сияние — Кергелен — Согра".

Эксперименты с искусственными полярными сияниями позволяют исследовать структуру магнитного поля Земли, взаимосвязь процессов, протекающих в ионосфере, влияние их на погоду у земной поверхности. При таких экспериментах удобными для введения в ионосферу (физики говорят для инжектирования) являются ионы бария. Примерно через 35 с после инжекции он возбуждается в солнечных лучах и создает яркое малиново-красное свечение.

Зодиакальный свет и противосияние

Скопления вещества встречаются во Вселенной в самых разнообразных размерах — от электронов и атомов до метеоров, астероидов, комет, планет, звезд и т. д. В рассеянии света наибольшая роль принадлежит скоплениям мелких частиц — межпланетной и межзвездной пыли.

Межпланетная пыль распределена по всему пространству Солнечной системы неравномерно. Основное ее количество концентрируется в плоскости эклиптики. Это скопление пыли, заполняющей межпланетное пространство между Землей и Солнцем, называется зодиакальным пылевым облаком. Рассеяние солнечного света на пылинках этого облака создает зодиакальный свет.

Зодиакальный свет имеет вид светового конуса, вытянутого вдоль эклиптики от горизонта к зениту. Широкая и наиболее яркая часть конуса находится у горизонта. Зодиакальный свет лучше всего виден у западного горизонта в конце и после вечерних сумерек и у восточного перед рассветом при углах погружения Солнца под горизонт 15—30°. Спектр зодиакального света оказался таким, как солнечный. Это говорит о том, что свечение в зодиакальном свете является отраженным или рассеянным солнечным светом.

Яркость зодиакального света может быть в три раза больше яркости Млечного Пути в его южной части, а минимальная яркость в два-три раза больше звездной составляющей в галактическом поясе. Зодиакальный свет лучше всего виден в низких широтах от 0 до 45°.

С орбитальных станций и с космических кораблей наблюдения зодиакального света возможны в направлениях, близких к ночному или сумеречному горизонту, также при углах погружения Солнца 15—30°. У ночного горизонта зодиакальный свет виден на фоне слоев ночного свечения атмосферы. Если измерения яркости зодиакального света проводятся спектрально, с фильтрами, например, вырезающими яркие линии свечения атомарного кислорода (зеленую 0,5577 мкм и красную 0,630 мкм), то можно надежнее измерить яркость зодиакального света.

Космонавтами была обнаружена лучевая структура зодиакального света (яркостные контрасты составляли около 10%, т. е. уверенно фиксировались

зрительно). Лучевая структура, по-видимому, обусловлена прохождением метеорных потоков.

Пыль в межпланетном пространстве образуется при дроблении астероидов и распаде комет.

Астероиды — это малые планеты, т. е. небольшие тела, движущиеся вокруг Солнца по эллиптическим орбитам. Бо́льшая часть их находится между орбитами Марса и Юпитера. Диаметры крупных астероидов достигают нескольких сотен километров (Церера —768 км, Паллада —489 км, Юнона —193 км, Веста —385 км), мелких — нескольких километров.

Кометы — это тела солнечной системы, движущиеся вокруг Солнца по сильно вытянутым эллиптическим орбитам. Кометы состоят из небольшого ядра (несколько километров в диаметре) и очень длинного хвоста, простирающегося на тысячи и миллионы километров. За длинный хвост кометы и получили свое название: „комета“ в переводе с греческого означает „длинноволосый“.

Примерно на 40° вокруг антисолярной точки простирается слабое диффузное свечение эллиптической формы. Это противосияние. Оно имеет зеленоватую окраску, аналогичную окраске свечения ночного неба или полярных сияний. Оно похоже на свечение газов, в основном азота и кислорода. Как теперь установили, противосияние представляет собой проекцию газового хвоста Земли на звездное небо. Свечение начинается с расстояния около 125 000 км от Земли, т. е. за пределами ее геометрической тени. Газовый хвост Земли простирается примерно на 650 000 км, т. е. выходит далеко за орбиту Земли. Он состоит из быстро движущихся молекул воздуха, выброшенных за границы атмосферы отталкивающим действием солнечных лучей. Газы рассеиваются в межпланетное пространство. „Утечка“ атмосферы в газовом хвосте компенсируется при извержениях вулканов и при ряде биологических процессов. Земля со своим длинным хвостом по внешнему виду напоминает комету.

Роль противосияния в освещении земной поверхности незначительна ввиду его малой яркости. Однако его открытие имеет большое значение для астрофизики.

Исследования зодиакального света и противосияния с поверхности Земли и из космоса позволили составить первое представление о примерном распределении пыли в зодиакальном облаке. Концентрация пыли неравномерная. Основная масса пыли сосредоточена внутри земной орбиты. Вблизи планет пыли больше, чем в других местах. В близкой околосолнечной области есть пустая зона, в которой нет пылевых частиц, так как любая попадающая сюда частица должна испариться или расплавиться.

Помимо звезд, планет и других уже рассмотренных небесных тел, в нашей Галактике имеются туманности, занимающие большие области пространства, заполненные светящимися газами и пылевыми облаками. Они или самостоятельно движутся в космическом пространстве, или ореолом окружают звезды. От таких туманностей исходит свет двух типов. В основном это люминесценция газов, составляющих туманность („холодный“ свет), и свет, рассеянный пылевыми облаками такой туманности.

О наличии пыли в межзвездном пространстве говорят „темные“ области в разных частях неба, особенно в Млечном Пути. Считают, что это пылевые межзвездные облака, которые частично экранируют свет звезд и посылают рассеянный свет.

Какой источник дает больший вклад в освещение Земли?

Мы рассмотрели все источники освещения земной поверхности ночью. Подведем итоги, оценим вклад каждого из них в отсутствие Луны.

Освещенность земной поверхности в безлунные ночи при ясной погоде изменяется от 0,0005 до 0,001 лк. В пасмурную дождливую погоду освещенность может уменьшаться в 10 раз и более. В больших городах за счет искусственных источников света, отражаемого облачным покровом, освещенность может достигать 1 лк.

Количественное соотношение между звездным светом и ночным свечением атмосферы изменяется на протяжении ночи, может сильно изменяться от одной ночи к другой, а также различается в зависимости от участка небосвода.

В отсутствие полярных сияний в направлении на Полюс мира вклад ночного свечения атмосферы изменяется от 24 до 54%, составляя в среднем 40—45% общего освещения Земли. В зените ночное свечение атмосферы может быть слабее звездной составляющей, если вблизи этой точки проходит Млечный Путь. При приближении к горизонту, наоборот, основное излучение обусловливается ночным свечением атмосферы. На долю звездной составляющей приходится в среднем за ночь около 30% общего освещения атмосферы. Таким образом, свет звезд и ночное свечение атмосферы вместе обусловливают около 70—75% освещения земной поверхности. Остальные 25—30% создаются солнечным светом, рассеянным на межпланетной пыли, и звездным светом, рассеянным на межзвездной пыли.

Итак, мы видим, что рассеянный свет из околосолнечного и межзвездного пространства нашей Галактики доходит до земной поверхности еще в заметном количестве и участвует в освещении Земли. Зададимся таким вопросом: ограничивается ли мир рассеянного света нашей Галактикой? Есть ли источники света за ее пределами и что мы знаем о них и об их роли?

Внегалактические источники свечения

Свечение объектов, расположенных за пределами нашей Галактики, называют внегалактическим свечением. Эти объекты видны в телескопы как маленькие, слабо светящиеся туманные пятнышки. В отличие от туманностей нашей Галактики эти туманности представляют собой не просто газопылевые облака, а огромные звездные системы, подобные нашей Галактике. Их называют также Островными Вселенными или галактиками (с маленькой буквы).

Наиболее близко к нашей Галактике расположены Большое и Малое Магеллановы Облака (на небосводе южного полушария) и туманность в созвездии Андромеды — они видны невооруженным глазом. Это самый далекий объект Вселенной, который можно увидеть простым глазом. Расстояние до туманности Андромеды 10^6 световых лет. Другие туманности видны только в телескопы.

Галактики занимают огромные пространства и находятся от нашей Галактики и друг от друга на расстояниях от 10^5 до 10^9 световых лет, вплоть до наблюдаемых в настоящее время границ Вселенной.

Наблюдать внегалактическое свечение с Земли трудно, так как мешает яркий „передний“ фон, создаваемый ночным свечением атмосферы, зодиакальным и звездным светом, межзвездной пылью нашей Галактики. Несколько более перспективными являются измерения с космических кораблей и спутников, но и в этом случае передний фон не убирается полностью.

Яркость внегалактического свечения по очень приближенным оценкам составляет около 0,1 яркости света, рассеянного в нашей Галактике.

Еще об одной загадке ночного неба

Эта загадка ночного неба возникла в связи с подсчетом числа звезд на небосводе и оценкой его яркости. Когда по мере совершенствования телескопов стали открывать все новые и новые звезды и стало известным, что многие звезды значительно больше и ярче Солнца, зародилось сомнение или, точнее, возник вопрос: почему ночное небо такое темное?

Этот вопрос впервые был сформулирован в 1826 г. австрийским астрономом В. Ольберсом и получил название парадокса Ольберса. Ольберс писал: „Если бы все пространство действительно было заполнено солнцами и если бы они располагались на одинаковых расстояниях друг от друга и группировались в системы, подобные Млечному Пути, то число их было бы бесконечным и весь небосвод был бы столь же ярким, как само Солнце, так как каждый луч зрения в любом направлении обязательно натолкнулся бы на звезду; таким образом, каждая точка на небе посылает к нам луч звезды или, что то же самое, свет Солнца“.

Но ведь ночное небо темное! И это надо было объяснить.

Одна из первых попыток разрешить парадокс Ольберса состояла в следующем: большая часть излучения далеких звезд на их пути к Земле поглощается пылью и газами, находящимися в межзвездном пространстве. Однако пыль, поглощая излучение бесконечного числа звезд, в свою очередь должна была бы нагреться до температур, близких к звездным, и излучать свет, подобный звездному.

Приведем другое объяснение, выдвинутое самим Ольберсом. Допустим, что звезд бесконечно много и они распределены во Вселенной равномерно. Освещенность на зрачке нашего глаза, создаваемая каждой отдельной звездой и определяющая наше субъективное световое ощущение от звезды, как известно, уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния до звезды. Число же звезд в определенном заданном телесном угле возрастает прямо пропорционально квадрату расстояния. В результате полное количество света, получаемое от звезд в пределах данного телесного угла, остается одним и тем же. Поэтому яркость неба не увеличивается до бесконечности и ночное небо остается темным.

Допущение о бесконечно большом числе звезд да еще равномерно распределенных в бесконечной Вселенной, как мы уже знаем, не подтвердилось наблюдениями. К парадоксу Ольберса вернулись через 100 с лишним лет, после того как были открыты другие галактики. Этот парадокс вставал снова, теперь применительно к галактикам. Его можно было сформулировать так: если все пространство в бесконечной Вселенной заполнено галактиками и число галактик бесконечное, то весь небосвод

должен иметь яркость, типичную для галактик, так как каждый луч зрения, проведенный в любом направлении, обязательно должен натолкнуться на какую-либо галактику; таким образом, каждая точка неба посылает нам луч от какой-нибудь далекой галактики, поэтому яркость неба должна быть типичной для внегалактического объекта, например такой, как у туманности Андромеды. Однако яркость неба оказывается значительно меньшей, примерно в 40 раз.

Фотографирование спектров далеких галактик с помощью спектрографов принесло неожиданные и странные результаты. Оказалось, что знакомые и легко отождествляемые в спектрах линии, например атомарного водорода, ионизированного кальция и других атомов, находятся не на своих местах, а смещены к красному концу спектра. Красное смещение наблюдалось у всех галактик, только у одних оно было больше, у других меньше. У звезд и других объектов нашей Галактики его не было.

Наиболее вероятным объяснением красного смещения в спектрах считают эффект Доплера, возникающий при движении источника света в сторону от наблюдателя. В нашем случае он мог возникнуть при движении галактик прочь от Земли. При этом происходит как бы „растягивание" излучаемых длин волн, т. е. смещение их к красному концу спектра, пропорциональное скорости удаления. Если бы источник двигался навстречу наблюдателю, то длины излучаемых волн должны были бы „укорачиваться", т. е. смещаться в сторону более коротких длин волн (фиолетовое смещение).

Если принять красное смещение спектров галактик за доплеровское, то следует признать, что все галактики удаляются от Земли, т. е. разбегаются! Скорость разбегания галактик нельзя считать скоростью их движения в пространстве. Каждая галактика почти неподвижна относительно окружающего ее пространства. Разбегание галактик является следствием расширения самого пространства с почти неподвижными (по космическим масштабам) галактиками. Скорость галактик в „своем пространстве" обычно не превышает 1000 км/с. Не следует думать, что наша Земля или даже наша Галактика являются центром такого разбегания галактик, оставаясь в неподвижной точке. В какой бы из галактик ни находился наблюдатель, ему всегда будет казаться, что все остальные галактики от него удаляются. Таким образом разбегание, а точнее сказать расширение, является всеобщим свойством нашей Вселенной.

Некоторое представление о физической картине такого расширения можно получить, если представить себе надуваемый резиновый шар или лучше серию резиновых шаров, помещенных один в другом. Галактики изображаются точками на поверхности этих шаров. При надувании шаров все галактики удаляются друг от друга и это удаление видно из любой точки, т. е. из любой галактики, куда бы мы не поместили наблюдателя.

Идея о расширении Вселенной впервые была высказана и, что еще более важно, обоснована математически советским метеорологом А. А. Фридманом в 1922 г. Фридману впервые удалось решить уравнения общей теории относительности Эйнштейна в предположении однородности и изотропности Вселенной. Из его решения вытекало, что Вселенная не может быть стационарной, она должна или расширяться, или сжиматься, или пульсировать. Красное смещение подтверждает расширение Вселенной. Такую картину мира, или, как теперь часто говорят, сценарий Вселенной, назвали расширяющейся Вселенной.

Дальнейшие исследования астрофизиков показали, что чем дальше галактика, тем у нее сильнее красное смещение и, следовательно, тем с большей скоростью она от нас удаляется. Американские астрономы Э. Хаббл и М. Хьюмасон установили, что отношение скорости удаляющейся галактики V к расстоянию до нее D есть величина приблизительно постоянная, т. е. $V/D = \mathrm{const} = 1/3 \cdot 10^7\ \mathrm{c}^{-1}$. Эту константу назвали постоянной Хаббла.

Свет от далеких галактик по мере их удаления становится все более и более длинноволновым. Когда излучение галактик перейдет в инфракрасную область, мы их перестанем видеть. На еще большем расстоянии излучения далеких галактик доходят до Земли уже в виде радиоволн, длины которых все больше и больше увеличиваются.

Скорость разбегающихся галактик, как уже сказано, возрастает с увеличением расстояния до них. Что же будет, когда их скорость достигнет скорости света — предельно возможной скорости движения в пространстве? Галактики станут для нас невидимыми, их излучение уже никогда не сможет дойти до Земли. Расстояние, на котором это происходит, и определяет собою доступную наблюдениям границу Вселенной, или „горизонт видимости". С помощью постоянной Хаббла определили, что граница видимой Вселенной лежит от нас на расстоянии 10 млрд. световых лет. Насколько велика эта область, трудно даже представить. В ней размещается 10^{10} галактик. Их совокупность называют Метагалактикой.

Хочу еще раз обратить внимание читателя на то, что граница наблюдаемой Вселенной определяется не уровнем нашей технической оснащенности, не уровнем совершенствования астрономических приборов, а конечной скоростью распространения света.

С помощью описанной модели расширяющейся Вселенной был разрешен парадокс Ольберса. Ночное небо получило „узаконенное право" оставаться темным. Со временем, по мере того как удаляющиеся галактики будут достигать „горизонта видимости" и уходить за него, ночное небо будет становиться все более темным.

Яркость наблюдаемого нами ночного неба обусловливается конечными размерами видимой Вселенной.

Путешествие в пространстве и во времени

Мы рассмотрели все источники освещения земной поверхности ночью. Общий свет, посылаемый всеми источниками,— это свечение ночного неба. Три его главные компоненты — ночное свечение атмосферы, звездный и зодиакальный свет — имеют яркость приблизительно одного порядка. Разделению общего потока, исходящего от ночного неба, на отдельные составляющие помогают следующие обстоятельства. Во-первых, спектр свечения атмосферы состоит главным образом из линий и полос, принадлежащих различным газам атмосферы. Длины волн и яркость этих линий и полос можно измерить спектрографически, и тем самым отделить ночное свечение атмосферы от звездного и зодиакального, которые имеют непрерывные спектры. Яркость излучаемого ими света измеряется в участках спектра, свободных от линий и полос поглощения и излучения газов, составляющих воздух. Во-вторых, у звездного и зодиакального света поло-

жение на небосводе и время наблюдения главного максимума яркости различаются, что позволяет отделить их друг от друга.

Исследование свечения ночного неба, выделение каждой компоненты из общего света, поступающего от ночного неба, принесло и продолжает приносить много сведений о верхней атмосфере Земли, о Солнечной системе, о нашей Галактике и о строении всей Вселенной.

Небо — это книга, в которой изложено и прошлое и будущее Вселенной. В необъятных просторах космоса звезды всех возрастов: молодые, среднего возраста, угасающие и уже угасшие. Время от времени вспыхивают сверхновые звезды. В небесной книге многократно повторено то, что было с такой звездой, как Солнце, и окружающими ее планетами, и что будет с ними. Это как бы миллиарды лет существования Вселенной развернутые в пространстве. Изучая небо, человек мысленно совершает путешествие в пространстве и во времени, в прошлое и будущее Вселенной. И действительно, как мы узнали из изложенного в последней главе, свечение ночного неба складывается из компонент, зарождающихся на самых разнообразных расстояниях от Земли, и поэтому свет от них проходит во Вселенной пути самой различной длины, поступая в наш глаз одновременно. „Достаточно беглого взгляда на звездное небо, чтобы уловить свет, рожденный в слое ночного свечения атмосферы на высоте в сотню километров всего 1 мкс тому назад, свет, испущенный ближайшей звездой Альфа Центавра около 4 лет назад, свет, покинувший сверкающую звезду Ригель во времена Коперника; свет одной из соседних галактик, прекрасной туманности Андромеды, отправившийся в путь тогда, когда на Земле только появился человек; свет, излученный одной из самых удаленных туманностей... тогда, когда Земля только образовывалась."*

Свет приносит нам вести о Вселенной. Однако те кванты света, которые приходят к нам сейчас, говорят о том, в каком состоянии были источники тогда, когда кванты покинули их. О том, что же произошло с далекими источниками за многие миллионы и миллиарды лет, пока свет от них доходил до нас, да и существуют ли они в настоящее время, судить смогут лишь наши весьма далекие потомки.

Закончим рассказ о загадках ночного неба словами великого поэта, математика и философа Востока Омара Хайяма, которые образно и мудро подытоживают все, что было изложено нами на многих страницах этой главы:

И вся Вселенная и все дела Земли —
Обманный сон, мираж и краткое мгновенье.

---

* Роч Ф., Гордон Дж. Свечение ночного неба. М., „Мир", 1977.

Послесловие

Читатель, прощай! Смотри же читай
со вниманием, да не поминай лихом!

Козьма Прутков

Наш рассказ о мире солнечного света закончен. Мы „побывали“ на Земле, в ее атмосфере, на других планетах и в межпланетном пространстве Солнечной системы. „Обошли“ весь мир солнечного света и вышли за его пределы в звездный мир нашей Галактики и к другим галактикам. Здесь уже другие миры и светят другие солнца! Свет от них, распространяясь в безграничных просторах Вселенной, заполненной разнообразными скоплениями вещества, рассеивается и поглощается постоянно и повсеместно, как и в нашем мире солнечного света.

На протяжении всей книги мы старались показать, какое множество загадок загадывал человеку небесный свод. Большинство из них были обнаружены при наблюдении небесного свода без каких-либо приборов просто невооруженным глазом. А сколько новых знаний было получено, сколько открытий было сделано в процессе отгадывания загадок! По мере того как удавалось решить одни загадки, небосвод задавал новые.

Мне хочется пожелать всем, любящим природу, особенно молодежи: при каждой возможности — в туристическом походе, на полевых работах, на любой прогулке, просто на отдыхе — пристально наблюдайте за окружающей природой и она загадает вам еще много интересных новых загадок!

Солнечные лучи освещают весь земной шар. Прекрасен мир солнечного света. Он доставляет радость всем живущим на Земле, и наша общая задача — сохранить его красоту для будущих поколений.

Оглавление

РЕФРАКЦИЯ СВЕТА В АТМОСФЕРЕ

ОСВЕЩЕННОСТЬ ЗЕМЛИ В РАЗНОЕ ВРЕМЯ СУТОК

На первой стороне обложки. Лучи иззаоблачного сияния. Дворцовая площадь в Ленинграде. (Фото В. Я. Денисова)
На четвертой стороне обложки. Венец вокруг Луны. (Фото В. Я. Денисова)

Научно-популярное издание

Софья Васильевна Зверева

В мире солнечного света

Редактор М. Г. Тараканова. Художник Е. Е. Городная. Художественный редактор Б. А. Денисовский. Технические редакторы: Л. М. Шишкова, М. И. Брайнина. Корректор И. Б. Михайлова

ИБ № 1703

Сдано в набор 18.01.88. Подписано в печать 17.08.88. М-27152. Формат 60 × 84[1]/16, бумага тип. № 1 и офсетная. Гарнитура литературная. Печать высокая и офсетная. Усл. печ. л. 10,7 (с вкладками). Усл. кр.-отт. 23,26. Уч.-изд. л. 13,12. Тираж 151 000 экз. Индекс ПЛ-200. Заказ № 809. Цена 95 коп.

Гидрометеоиздат. 199226. Ленинград, ул. Беринга, 38.

Республиканская ордена „Знак Почета“ типография им. П. Ф. Анохина Государственного комитета Карельской АССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли, 185630, Петрозаводск, ул. „Правды“, 4

95 коп.

Софья Васильевна Зверева — известный популяризатор науки, автор популярных статей по атмосферной оптике и атмосферному электричеству,



кандидат географических наук, доцент Ленинградского гидрометеорологического института (ЛГМИ). Много лет читала лекции по атмосферной оптике в ЛГМИ. Автор нового оригинального „Задачника по атмосферной оптике, электричеству и акустике“. С 1975 г. и по настоящее время референт ВИНИТИ. За период работы в ВИНИТИ в Реферативном журнале (Геофизика) опубликовано более 1000 рефератов по атмосферной оптике и актинометрии, выполненных С. В. Зверевой.



ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ 1988

С. В. Зверева

В мире СОЛНЕЧНОГО СВЕТА